ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ



ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

Αξιοποίηση των Αυξητικών Υλικών στον Σχεδιασμό Προφυλακτήρα Αυτοκινήτου

ΟΝΟΜΑ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ: ΠΑΠΑΔΟΚΩΣΤΑΚΗΣ ΗΡΑΚΛΗΣ

Ιδιότητα Συγγραφέα: Φοιτητής Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών

ΟΝΟΜΑ ΕΠΙΒΛΕΠΟΝΤΑ ΚΑΘΗΓΗΤΗ

Ιωάννης Ντιντάκης (PhD, Msc, BEng)
Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα 2
Πίνακας συντομεύσεων-ακρωνυμίων 5
Πρόλογος 6
Εισαγωγή 7
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή στην Προσθετική κατασκευή 8
1.1 Ιστορική αναδρομή της προσθετικής κατασκευής 8
1.2 Βασικές αρχές προσθετικής κατασκευής 9
1.3 Εφαρμογές προσθετικής κατασκευής 11
1.4 Τεχνολογίες και υλικά προσθετικής κατασκευής 14
1.4.1 Εξώθηση υλικού (Material extrusion) 15
1.4.2 Πολυμερισμός σε δεξαμενή (Vat photo-polymerization) 17
1.4.3 Digital light processing (DLP) 20
1.4.4 Εκτόξευση Υλικού (Material jetting) 21
1.4.5 Εναπόθεση συγκολλητικής ουσίας (Binder jetting) 22
1.4.6 Σύντηξη πούδρας σε κλίνη (Powder Bed Fusion – PBF) 24
1.4.7 Εναπόθεση με κατευθυνόμενη ενέργεια (Direct Energy Deposition -DED) 27
1.4.8 Συγκόλληση φύλλων (Sheet Lamination) 28
Κεφάλαιο 2 : Αυξητικά Υλικά 30
2.1 Εισαγωγή στα Αυξητικά Υλικά 30
2.2 Συντελεστής Young Modulus 31
2.3 Αυξητικές Δομές και Προσθετική Κατασκευή 31
2.4 Γενικές Ιδιότητες Αυξητικών Δομών 33
2.5 Συμπεριφορά και ανάλυση αυξητικών δομών 34
2.5.1 Δομές Re-entrant, Arrowhead, Anti-tetra Chiral 35
2.5.2 Δομές Non-Axial Joints structure, Curved Wall Structure, Mixed Star structure 40
2.5.3 Δομές honeycomb, Re-entrant auxetic, auxetic-strut, AH-V1, AH-V2 47
Κεφάλαιο 3: Εφαρμογές Αυξητικών Δομών 55
3.1 Γενικές Εφαρμογές 55
3.1.1 Κράνος ποδηλάτου 55
3.1.2 Kinesiology Tape 57
3.1.3 Crash Box προφυλακτήρα αυτοκινήτου 57
3.1.4 Σύστημα Προφυλακτήρα Αυτοκινήτου Με Αυξητικές Δομές 59
Κεφάλαιο 4: Προφυλακτήρας και Ανάλυση Κρούσης 62
4.1 Δομή προφυλακτήρα 62
4.2 Πρότυπα και κανονισμοί 63
4.3 Αυξητική δομή στο σύστημα προφυλακτήρα 64
4.4 Μηχανική κρούσης (Γενική θεωρεία) 65

4.5 Δοκιμές ανθεκτικότητας (crashworthiness test) – Προσομοιώσεις 66
Κεφάλαιο 5: Μεθοδολογία πειράματος και ανάλυση δομών 69
5.1 Στόχος και μεθοδολογία πειραματικής μελέτης 69
5.2 Επιλογή δομών 69
5.3 Ανάλυση δομής Re-entrant 70
5.3.1 Υπολογισμός λόγου Poisson (re-entrant) 71
5.3.2 Υπολογισμός σχετικής πυκνότητας (re-entrant) 72
5.3.3 Υπολογισμός μέτρου ελαστικότητας (re-entrant) 72
5.3.4 Υπολογισμός μέσης θλιπτικής τάσης (re-entrant) 73
5.3.5 Υπολογισμός μέσης δυναμικής τάσης (re-entrant) 73
5.3.6 Υπολογισμός μέτρου διάτμησης (re-entrant) 74
5.4 Ανάλυσης δομής Arrowhead 75
5.4.1 Υπολογισμός λόγου Poisson (arrowhead) 76
5.4.2 Υπολογισμός σχετικής πυκνότητας (arrowhead) 76
5.4.3 Υπολογισμός μέτρου ελαστικότητας (arrowhead) 76
5.4.4 Υπολογισμός μέσης θλιπτικής τάσης (arrowhead) 77
5.4.5 Υπολογισμός μέσης δυναμικής τάσης (arrowhead) 77
5.5 Ανάλυση δομής anti-tetra chiral 78
5.5.1 Υπολογισμός λόγου Poisson (anti-tetra chiral) 80
5.5.2 Υπολογισμός σχετικής πυκνότητας (anti-tetra chiral) 81
5.5.3 Υπολογισμός μέτρου ελαστικότητας (anti-tetra chiral) 81
5.5.4 Υπολογισμός μέσης θλιπτικής τάσης (anti-tetra chiral) 82
5.5.5 Υπολογισμός μέσης δυναμικής τάσης (anti-tetra chiral) 83
5.6 Αποτελέσματα θεωρητικών υπολογισμών 84
5.6.1 re-entrant 84
5.6.2 Arrowhead 85
5.6.3 Anti-tetra chiral 85
Κεφάλαιο 6: Σχεδιασμός και Ομογενοποίηση 87
6.1 Σχεδιασμός 87
6.1.1 Σχεδιασμός re-entrant 87
6.1.2 Σχεδιασμός arrowhead 88
6.1.3 Σχεδιασμός anti tetra chiral 88
6.2 Ιδιότητες υλικού 89
6.3 Ομογενοποίηση (homogenization) 90
6.3.2 Θεωρητικό υπόβαθρο και βασικές σχέσεις 91
6.3.3 Βήματα ομογενοποίησης στο n-topology 92
6.2.4 Οπτικά αποτελέσματα δομών 98
6.4 Αποτελέσματα ομογενοποιημένου υλικού 99
Κεφάλαιο 7: Δυναμική Προσομοίωση 103

7.1 Σενάριο κρούσης 103
7.2 Μεθοδολογία και αποτελέσματα προσομοίωσης 103
7.2.1 Επιλογή τύπου προσομοίωσης και ορισμός υλικών 105
7.2.2 Ορισμός συνδέσμων (connections) 106
7.2.3 Οριακές συνθήκες και περιορισμοί (Fixtures) 107
7.2.4 Ορισμός αρχικής ταχύτητας (initial condition) 108
7.2.5 Ορισμός απόσβεσης (Damping) 109
7.2.6 Ορισμός ιδιοτήτων μη γραμμικής δυναμικής ανάλυσης (Simulation Properties) 109
7.2.3 Αποτελέσματα προσομοίωσης των δοκιμίων 110
7.2.3.1 Αποτελέσματα δομής Re-entrant 110
7.2.3.2 Αποτελέσματα δομής Arrowhead 114
7.2.3.3 Αποτελέσματα δομής Anti-tetra chiral 117
7.2.3.4 Αποτελέσματα υλικού EPP (Expanded Polypropylene) 119
7.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων 122
Κεφάλαιο 8: Στατική προσομοίωση στο λογισμικό N-topology 124
8.1 Μεθοδολογία Μοντελοποίησης και ανάλυσης ομογενοποιημένου υλικού 124
8.2 Μεθοδολογία Μοντελοποίησης και ανάλυσης πλήρους γεωμετρίας 129
8.3 Συγκριτική Αξιολόγηση Ομογενοποιημένου Μοντέλου και Πλήρους Γεωμετρίας. 131
8.3.1 Δομή Re-entrant 131
8.3.2 Δομή Arrowhead 132
8.3.3 Δομή Anti-tetra chiral 132
8.3.4 Σύγκριση Αποτελεσμάτων 133
Βιβλιογραφία/Αναφορές 136

Πίνακας συντομεύσεων-ακρωνυμίων

CAD	Computer Aided Design
STL	Standard Tessellation Language
EPP	Expanded Polypropylene
AM	Additive Manufacturing
FDM	Fused Deposition Modeling
SLA	Stereolithography
DLP	Digital Light Processing
PBF	Powder Bed Futon
DED	Directed Energy Deposition
SLS	Selective Laser Sintering
OEM	Original Equipment Manufacturer
TPU	Thermoplastic Polyurethane
PETG	Polyethylene Terephthalate Glycol
PLA	Polylactic Acid
ABS	Acrylonitrile Butadiene Styrene
FE/FEA	Finite Element/ Finite Element Analysis
AM structures	Additive Manufactured Structures

Πρόλογος

Η συνεχής εξέλιξη της αυτοκινητοβιομηχανίας επιβάλει την ανάπτυξη δομικών λύσεων που συνδυάζουν υψηλή ικανότητα απορρόφησης ενέργειας, μειωμένο βάρος και ελεγχόμενη διαχείριση δυναμικών φορτίσεων. Η συμπεριφορά του προφυλακτήρα κατά την κρούση, αποτελεί αντικείμενο έντονης ερευνητικής δραστηριότητας, καθώς επηρεάζει άμεσα τόσο την προστασία των επιβατών όσο και την δομική ακεραιότητα του οχήματος. Σε ένα περιβάλλον που οι απαιτήσεις ασφάλειας γίνονται ολοένα και αυστηρότερες, κάθε δομικό στοιχείο ενός συστήματος καλείται να συμβάλλει με προβλέψιμο και αξιόπιστο τρόπο στην συνολική σχεδιαστική στρατηγική, γεγονός που απαιτεί συστηματική αξιολόγηση της μηχανικής συμπεριφοράς.

Με την ραγδαία εξέλιξη της προσθετικής κατασκευής, ο σύγχρονος μηχανολογικός σχεδιασμός έχει αποκτήσει την δυνατότητα υλοποίησης γεωμετρικά πολύπλοκων δομών, οι οποίες δεν μπορούν να παραχθούν με συμβατικές μεθόδους παραγωγής. Στο πλαίσιο αυτό, οι αυξητικές δομές παρουσιάζουν ιδιαίτερο επιστημονικό και τεχνολογικό ενδιαφέρον, καθώς χαρακτηρίζονται από αρνητικό λόγο Poisson και εμφανίζουν μοναδική μηχανική συμπεριφορά υπό θλιπτική και δυναμική φόρτιση. Η ιδιότητα τους να διαστέλλονται εγκάρσια κατά την θλίψη τις καθιστά ικανές να επιτυγχάνουν βελτιωμένη απορρόφηση ενέργειας, αυξημένη αντοχή σε κρούση και ελεγχόμενη κατανομή τάσεων τα οποία είναι ιδιαίτερα κρίσιμα μηχανικά χαρακτηριστικά για εφαρμογές ασφάλειας.

Οι ιδιότητες αυτές έχουν οδηγήσει το ερευνητικό ενδιαφέρον σε διάφορους τομείς της μηχανικής. Η διεθνής βιβλιογραφία αναδεικνύει εφαρμογές τέτοιων δομών σε πεδία όπως η βιοϊατρική τεχνολογία, ο σχεδιασμός προστατευτικού εξοπλισμού καθώς και συστήματα αμυντικής προστασίας, υποδεικνύοντας το ευρύ φάσμα αξιοποίησης καθώς και τα πλεονεκτήματα που προσφέρουν στον σχεδιασμό σύγχρονων μηχανολογικών συστημάτων.

Η παρούσα μελέτη επικεντρώνεται στη διερεύνηση της δυνατότητας αξιοποίησης επιλεγμένων αυξητικών γεωμετριών για την ενσωμάτωση στο σύστημα του προφυλακτήρα αυτοκινήτου. Μέσω θεωρητικής ανάλυσης, υπολογισμού βασικών ιδιοτήτων, διαδικασία ομογενοποίησης και αριθμητικών προσομοιώσεων μη γραμμικής δυναμικής συμπεριφοράς, επιχειρείται η αξιολόγηση της απόδοσης των δομών σε σενάριο κρούσης. Παράλληλα, πραγματοποιείται σύγκριση με συμβατικό υλικό απορρόφησης ενέργειας, όπως το διογκωμένο πολυπροπυλένιο (Expanded Polypropylene - EPP), το οποίο χρησιμοποιείται στην αυτοκινητοβιομηχανία, προκειμένου να εκτιμηθεί η αποδοτικότητα των δομών ως εναλλακτική σχεδιαστική προσέγγιση.

Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την διερεύνηση μεταξύ γεωμετρίας και μηχανικής απόκρισης, μέσω της συστηματικής αξιολόγησης της συμπεριφοράς των δομών και της σύγκρισης τους με καθιερωμένες λύσεις της βιομηχανίας. Με το τρόπο αυτό, η παρούσα μελέτη συμβάλλει στην κατανόηση των δυνατοτήτων που προσφέρουν οι αυξητικές δομές στον σχεδιασμό μηχανολογικών συστημάτων παθητικής προστασίας και επιχειρεί να αναδείξει τον ρόλο της γεωμετρίας ως βασικό παράγοντα διαμόρφωσης των μηχανικών ιδιοτήτων, συμπληρώνοντας τη συμβατική προσέγγιση υλικό – ιδιότητες με την προσέγγιση γεωμετρία – δομή – συμπεριφορά.

Εισαγωγή

Η συνεχής εξέλιξη των τεχνολογιών κατασκευής και των μεθόδων σχεδιασμού έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη νέων κατηγοριών δομών με προηγμένες μηχανικές ιδιότητες. Στο πλαίσιο αυτό, ιδιαίτερο ερευνητικό ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα αυξητικά υλικά (auxetic materials), τα οποία χαρακτηρίζονται από αρνητικό λόγο Poisson και εμφανίζουν ασυνήθιστη μηχανική συμπεριφορά υπό μηχανική φόρτιση. Η ιδιότητά τους να διαστέλλονται εγκάρσια κατά την θλίψη ή να συστέλλονται κατά τον εφελκυσμό τα καθιστά ιδιαίτερα ελκυστικά για εφαρμογές όπου απαιτείται αυξημένη απορρόφηση ενέργειας, αντοχής σε κρούση και βελτιωμένη κατανομή τάσεων.

Η ανάπτυξη και η πρακτική αξιοποίηση τέτοιων δομών είναι δυνατή χάρη την πρόοδο της προσθετικής κατασκευής (Additive Manufacturing), η οποία επιτρέπει την δημιουργία γεωμετρικά πολύπλοκων κυψελωτών δομών που δεν μπορούν να παραχθούν με συμβατικές μεθόδους παραγωγής. Μέσω των τεχνολογιών αυτών, καθίσταται εφικτός ο σχεδιασμός δομών στις οποίες οι μηχανικές ιδιότητες δεν εξαρτώνται αποκλειστικά από το υλικό, αλλά και από την γεωμετρία της μικροδομής τους. Με τον τρόπο αυτόν μπορεί να επιτευχθεί στοχευμένη διαμόρφωση ιδιοτήτων όπως η ακαμψία, η αντοχή και η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας.

Στην αυτοκινητοβιομηχανία η ανάγκη για βελτίωση της ασφάλειας των οχημάτων, των επιβατών και τον πεζών έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη συστημάτων που μπορούν να απορροφούν αποτελεσματικά την ενέργεια και να περιορίζουν τις μέγιστες δυνάμεις κατά την διάρκεια μίας σύγκρουσης. Ο προφυλακτήρας αποτελεί ένα από τα βασικά στοιχεία προστασίας του οχήματος, καθώς λειτουργεί ως πρώτο επίπεδο απορρόφησης ενέργειας κατά την κρούση. Παραδοσιακά, η απορρόφηση αυτή κυρίως σε χαμηλές ταχύτητες κρούσης επιτυγχάνεται μέσω αφρωδών υλικών, όπως το διογκωμένο πολυπροπυλένιο (Expanded Polypropylene – EPP), το οποίο παρουσιάζει καλή συμπεριφορά σε δυναμικές καταπονήσεις. Ωστόσο, η εισαγωγή κυψελωτών και αυξητικών δομών δημιουργεί νέες δυνατότητες σχεδιασμού για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης και της μηχανικής συμπεριφοράς των συστημάτων αυτών.

Στο πλαίσιο αυτό, η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει τη δυνατότητα αξιοποίησης επιλεγμένων αυξητικών δομών ως εναλλακτικών δομικών λύσεων σε συστήματα απορρόφησης ενέργειας προφυλακτήρα αυτοκινήτου. Η μελέτη εστιάζει στην κατανόηση της σχέσης μεταξύ γεωμετρικών παραμέτρων και μηχανικής συμπεριφοράς, καθώς και στην αξιολόγηση της απόδοσης των δομών σε συνθήκες δυναμικής φόρτισης.

Για τον σκοπό αυτό, ακολουθείται μια μεθοδολογική προσέγγιση που συνδυάζει θεωρητική ανάλυση, γεωμετρική μοντελοποίηση και αριθμητική προσομοίωση. Αρχικά, πραγματοποιείται επιλογή αντιπροσωπευτικών αυξητικών δομών βασισμένη στην βιβλιογραφία, με στόχο την κατανόηση του τρόπου με τον οποίο τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δομών επηρεάζουν τις μηχανικές ιδιότητες. Στο πλαίσιο αυτό υπολογίζονται βασικοί παράμετροι, όπως ο λόγος Poisson, το μέτρο ελαστικότητας και η σχετική πυκνότητα, οι οποίες επιτρέπουν την αρχική ποσοτική εκτίμηση της συμπεριφοράς τους.

Στην συνέχεια, εφαρμόζεται διαδικασία ομογενοποίησης (homogenization), με στόχο τον προσδιορισμό των ισοδύναμων μακροσκοπικών μηχανικών ιδιοτήτων των αυξητικών δομών που μελετώνται. Η προσέγγιση αυτή κρίνεται απαραίτητη λόγω της πολύπλοκης γεωμετρίας, η οποία οδηγεί σε ιδιαίτερα αυξημένο υπολογιστικό κόστος όταν επιχειρείται η άμεση προσομοίωση τους με πλήρη γεωμετρική λεπτομέρεια, ειδικότερα σε υπολογιστικά μοντέλα μεγάλης κλίμακας. Μέσω της διαδικασίας της ομογενοποίησης, η αναλυτική γεωμετρία της μικροδομής αντικαθίσταται από ένα ισοδύναμο συνεχές μέσο, το οποίο περιγράφεται ως συμπαγής όγκος με ισοδύναμες μηχανικές ιδιότητες.

Επιπλέον, πραγματοποιούνται αριθμητικές προσομοιώσεις μη γραμμικής δυναμικής ανάλυσης (non–linear dynamic event) σε σενάριο κρούσης χαμηλής ταχύτητας, όπου τα δοκίμια που εξετάζονται υποβάλλονται σε συγκεκριμένες οριακές συνθήκες και συνθήκες φόρτισης, για την αξιολόγηση της απόδοσής τους. Τέλος, παρουσιάζεται μια στατική ανάλυση για την αξιολόγηση της ακρίβειας της ομογενοποίησης ως προσεγγιστική λύση σε σχέση με την πραγματική γεωμετρική αναπαράσταση των αυξητικών δομών.

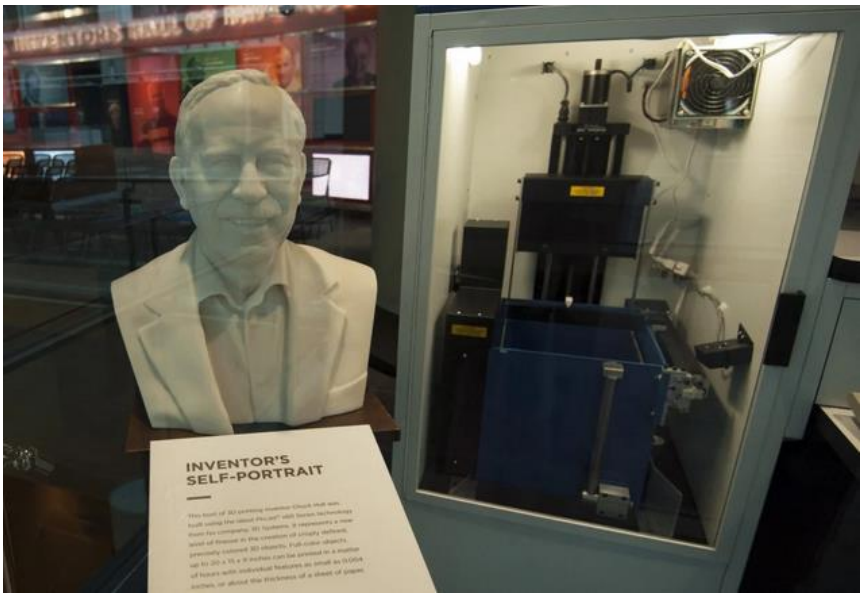
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή στην Προσθετική κατασκευή

1.1 Ιστορική αναδρομή της προσθετικής κατασκευής

Η τεχνολογία προσθετικής κατασκευής (Additive Manufacturing - AM), γνωστή και ως τρισδιάστατη εκτύπωση, έχει τις ρίζες της στις αρχές της δεκαετίας του 1980. Εμφανίστηκε ως απάντηση στις ανάγκες για ταχύτερη και πιο αποδοτική παραγωγή πρωτοτύπων και εξαρτημάτων. Από τότε, η τεχνολογία έχει εξελιχθεί ραγδαία, εισάγοντας νέες μεθόδους και εφαρμογές που βρίσκουν χρήση σε πολλούς κλάδους όπως η αυτοκινητοβιομηχανία, η αεροδιαστημική, η ιατρική, η παραγωγή καταναλωτικών προϊόντων κ.α. . Αυτή η επανάσταση έχει αλλάξει τον τρόπο σχεδιασμού και παραγωγής διάφορων προϊόντων.

Η πρώτη πρακτική εφαρμογή της αποδίδεται στον Hideo Kodama, ο οποίος το 1980 παρουσίασε τη μέθοδο χρήσης φωτοπολυμερών για τη δημιουργία τρισδιάστατων αντικειμένων. Ωστόσο, η ιδέα του δεν υλοποιήθηκε εμπορικά λόγω περιορισμών στη χρηματοδότηση.

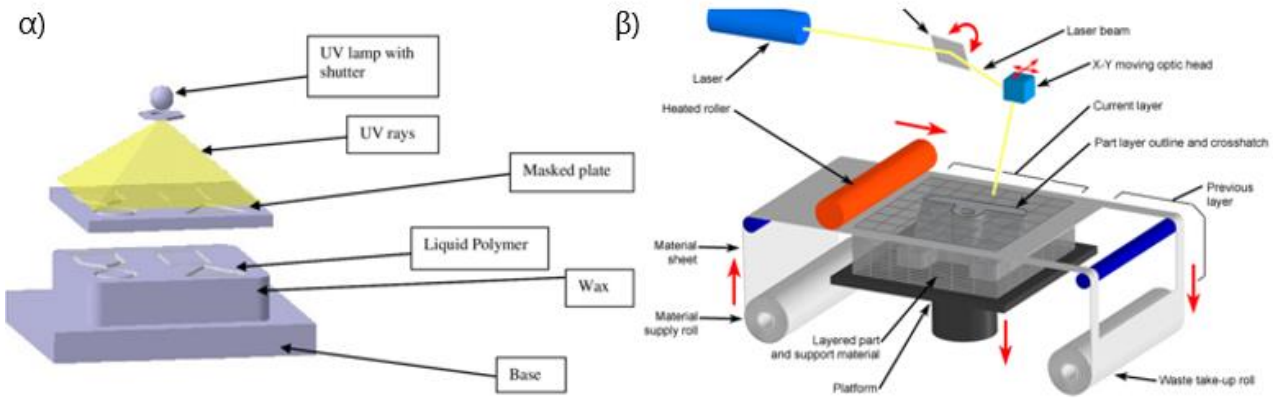
Η πραγματική ώθηση δόθηκε 1986 από των Chuck Hull, ο οποίος ανέπτυξε τη μέθοδο στερεολιθογραφίας (SLA), την πρώτη τεχνολογία ταχείας προτυποποίησης, που επέτρεψε τη δημιουργία αντικειμένων από υγρή ρητίνη μέσω UV λέιζερ. Ο Hull ίδρυσε επίσης την 3D Systems, καθιερώνοντας τη στερεολιθογραφία στην αγορά κυκλοφορόντας το 1988 τον SLA-1 (σχήμα 1.1.1), τον πρώτο εμπορικό τρισδιάστατο εκτυπωτή.



Σχήμα 1.1.1 *Chuck Hull και ο πρώτος εκτυπωτής SLA-1. [1]*

Το 1988, περίπου ένα χρόνο μετά την εφεύρεση του Hull, ο Carl Deckard από το Πανεπιστήμιο του Τέξας ανέπτυξε την επιλεκτική πυροσυσσωμάτωση με λέιζερ (SLS), μια διαφορετική τεχνολογία επιτρέποντας τη σύντηξη υλικών όπως πλαστικά, μέταλλα και κεραμικά. Λίγο αργότερα, ο Scott Crump εισήγαγε την τεχνολογία εναπόθεσης σύντηξης υλικού (FDM), που βασίζεται στην εξώθηση λιωμένου πλαστικού για τη δημιουργία αντικειμένων. Ποιο συγκεκριμένα η τεχνολογία FDM λειτουργεί με την εξώθηση νήματος από πλαστικό το οποίο λειώνει και έπειτα γίνεται στερεό δημιουργώντας το τρισδιάστατο αντικείμενο.

Στη δεκαετία του 1990, εντοπίζεται μεγάλη ανάπτυξη της προσθετικής κατασκευής. Το 1991, η τεχνολογία εξελίχθηκε περαιτέρω με την εισαγωγή νέων μεθόδων όπως το Solid Ground Curing (SGC) από την εταιρία Cubital και το Laminated Object Manufacturing (LOM) από την εταιρία Helisys (σχήμα 1.1.2), επεκτείνοντας τις εφαρμογές της σε τομείς όπως η αυτοκινητοβιομηχανία και η αεροναυπηγική. Σημαντική πρόοδος σημειώθηκε και στη βιοϊατρική, όπου ερευνητές κατάφεραν να εκτυπώσουν ιστούς για πρώτη φορά το 1999.



Σχήμα 1.1.2 *α)Solid Ground Curing (SGC) και β) Laminated Object Manufactory. (LOM)*

Τον 21 αιώνα παρουσιάζεται μια περίοδος πολύ μεγάλης ανάπτυξης, καθώς όλο και περισσότερες εταιρίες έχουν εισέλθει στην αγορά με αποτέλεσμα η τεχνολογία της προσθετικής κατασκευής να γίνεται πιο προσβάσιμη. Το 2005 δημιουργείται από τον καθηγητή Adrian Bowyer ο πρώτος επιτραπέζιος τρισδιάστατος εκτυπωτής, παίρνοντας την ονομασία RepRap. Ο τρισδιάστατος εκτυπωτής ήταν ανοιχτού κώδικα, κάνοντας την τεχνολογία ποιο προσιτή στο ευρύ κοινό καθώς μπορούσαν να τον αποκτήσουν για προσωπική χρήση.

Το 2007, η Object εισήγαγε τον πρώτο τρισδιάστατο εκτυπωτή πολλαπλών υλικών, παρέχοντας τη δυνατότητα δημιουργίας αντικειμένων με διαφορετικές ιδιότητες υλικού, γεγονός που επέκτεινε τις δυνατότητες της τεχνολογίας. Ακολούθως, το 2009, ο MakerBot έκανε την εμφάνισή του ως ο πρώτος 3D εκτυπωτής ευρείας χρήσης, χάρη στην εταιρεία που ίδρυσαν οι Bre Pettis, Adam Mayer και Zach Smith. Στόχος της MakerBot ήταν η διάθεση προσιτών λύσεων 3D εκτύπωσης για ερασιτέχνες χρήστες, διευκολύνοντας την απόκτηση εκτυπωτών για οικιακή και επαγγελματική χρήση.

Το 2011, η Prusa Research εισήγαγε τον Prusa i3, έναν τρισδιάστατο εκτυπωτή βασισμένο στην αρχιτεκτονική του RepRap, ο οποίος γρήγορα απέκτησε δημοτικότητα λόγω της προσιτής τιμής και της ευχρηστίας του. Στη συνέχεια, η MakerBot λάνσαρε τον Replicator 2, έναν προηγμένο επιτραπέζιο εκτυπωτή σχεδιασμένο για πιο εξειδικευμένους χρήστες, ο οποίος κατέκτησε την αγορά ως ένας από τους πιο διαδεδομένους εκτυπωτές της εποχής.

Με την εξαγορά της MakerBot από τη Stratasys το 2013, η προσθετική κατασκευή επεκτάθηκε περαιτέρω. Την ίδια χρονιά, η Markforged παρουσίασε τον Mark One, τον πρώτο εκτυπωτή που μπορούσε να εκτυπώσει μεταλλικά αντικείμενα, ανοίγοντας τον δρόμο για καινοτόμες εφαρμογές.

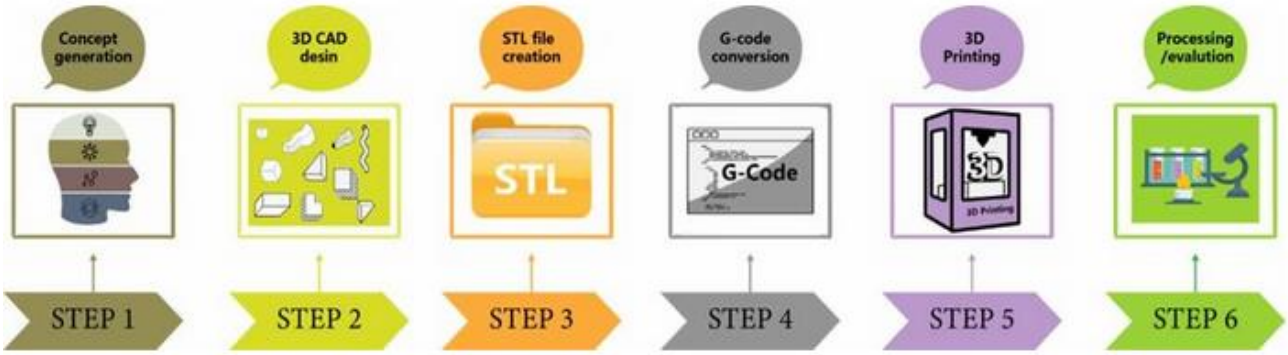
Στην σημερινή εποχή, η προσθετική κατασκευή παραμένει ένας τομέας με συνεχή ανάπτυξη, αλλάζοντας ριζικά τον τρόπο που αντιλαμβανόμαστε την κατασκευή και τη σχεδίαση προϊόντων. Επιπλέον, δίνει την δυνατότητα δημιουργίας αντικειμένων με εξελιγμένες γεωμετρίες, οι οποίες δεν θα ήταν εφικτές με παραδοσιακές μεθόδους κατασκευής. Ακόμα, επιτρέπει τη χρήση μιας ευρείας γκάμας υλικών, από πλαστικά και σύνθετα υλικά έως μεταλλικά κράματα και κεραμικά, προσφέροντας μεγαλύτερη ευελιξία στον σχεδιασμό και τη λειτουργικότητα των προϊόντων. [2], [3], [4], [5]

1.2 Βασικές αρχές προσθετικής κατασκευής

Η προσθετική κατασκευή (Additive Manufacturing) βασίζεται στη σταδιακή προσθήκη υλικού σε στρώσεις με σκοπό την δημιουργία αντικειμένων. Αντίθετα, στην αφαιρετική κατασκευή, το αντικείμενο σχηματίζεται μέσω της απομάκρυνσης υλικού από ένα συμπαγές κομμάτι, μέχρι να απομείνει το επιθυμητό τελικό προϊόν. Για την παραγωγή ενός αντικειμένου με προσθετική μέθοδο, το πρώτο βήμα είναι η δημιουργία ενός ψηφιακού μοντέλου με την χρήση λογισμικού σχεδίασης CAD ή μέσω αντίστροφης μηχανικής, όπου ένα υπαρκτό αντικείμενο σαρώνεται ώστε να μετατραπεί σε ψηφιακή μορφή.

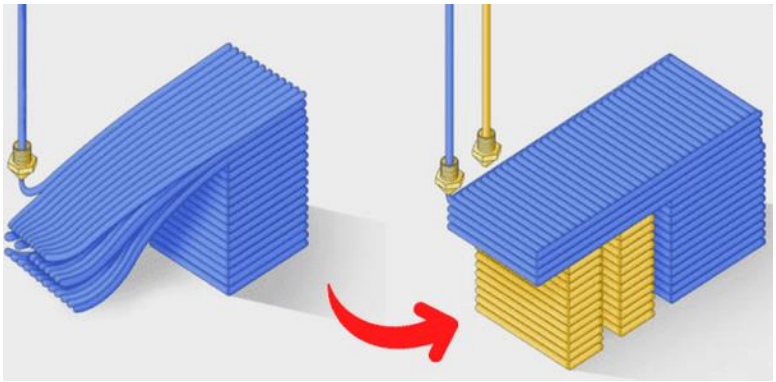
Στην συνέχεια το ψηφιακό μοντέλο μετατρέπεται σε μορφή αρχείου STL (Standard Template Library) δηλαδή σε μια απλοποιημένη μορφή, εξαλείφοντας περιττές πληροφορίες και μετατρέποντάς το σε γεωμετρικά πλέγματα (τρίγωνα). Ουσιαστικά περιγράφει την κλειστή εξωτερική επιφάνεια του αρχικού μοντέλου CAD και αποτελεί την βάση για τον υπολογισμό των στρώσεων.

Έπειτα, το αρχείο STL που περιγράφει το αντικείμενο πρέπει να μεταφερθεί στο μηχάνημα προσθετικής κατασκευής, οπότε το αρχείο εισάγεται σε λογισμικό επεξεργασίας (slicer), ώστε να γίνει έλεγχος των παραμέτρων εκτύπωσης. Αυτές περιλαμβάνουν τον προσανατολισμό του αντικειμένου, την κλίμακα, το ύψος, τον αριθμό των στρώσεων (layer height), την ταχύτητα εκτύπωσης, την δομή γεμίσματος (infill), την πρόσθεση υποστηρίξεων κ.α. Στην συνέχεια το αρχείο εξάγεται σε μορφή G-code (Geometric Code) που αποτελεί μια σειρά εντολών οι οποίες δίνουν ακριβή οδηγίες σχετικά με την κίνηση και των παραμέτρων που έχουν δοθεί από το λογισμικό επεξεργασίας. Στο σχήμα 1.2.1 αναφέρονται τα στάδια που ακολουθούν για την δημιουργία του τελικού αντικειμένου. [6]



Σχήμα 1.2.1 *Τα 6 στάδια -βήματα προσθετικής κατασκευής. [7]*

Μια πολύ σημαντική λειτουργεία μέσω του λογισμικού επεξεργασίας είναι οι υποστηρίξεις καθώς εξασφαλίζουν την μηχανική αγκύρωση του αντικειμένου κατά την κατασκευή. Σε αυτό το στάδιο είναι σημαντικό να αναφερθεί πως μεγάλη σημασία για την αποφυγή υποστηρίξεων έχει να κάνει ο σχεδιασμός ο οποίος έχει σημαντικό ρόλο αλλά και η τοποθέτηση (προσανατολισμός) του αντικειμένου στο build plate. Οι περισσότεροι εκτυπωτές μπορούν να χειριστούν κλίσεις έως 30 μοίρες χωρίς υποστήριξη και πάνω από αυτό το όριο η ανάγκη για υποστηρίξεις αυξάνεται, όπως φαίνεται και στην (σχήμα 1.2.2), που η κλίση του αντικειμένου έχει ξεπεράσει το όριο και χωρίς υποστηρίξεις θα καταρρεύσει.

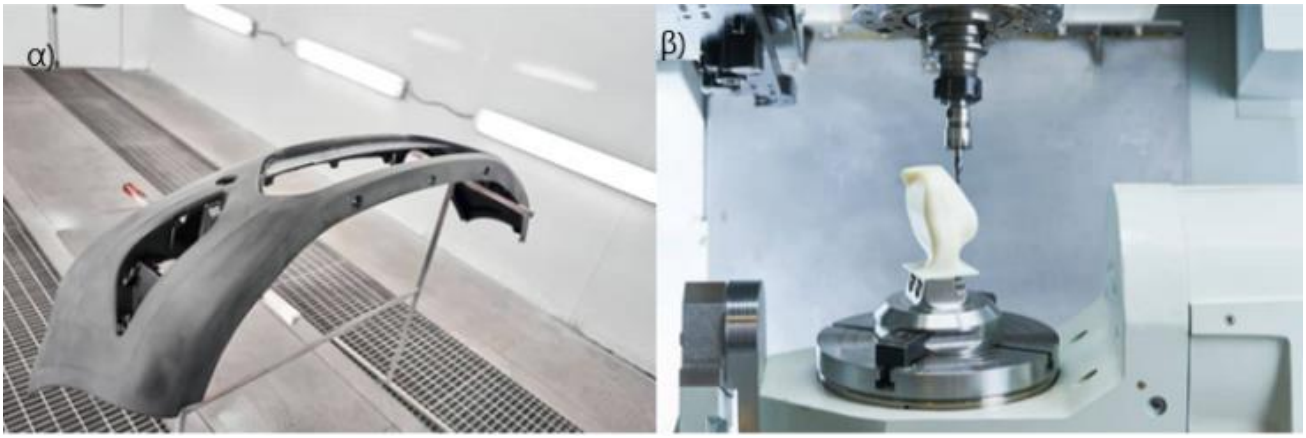


Σχήμα 1.2.2 *Χρήση υποστηρίξεων (supports) σε κλήση 90 μοιρών. [8]*

Οι μέθοδοι δημιουργίας υποστηριγμάτων μπορεί να διαφέρουν ανάλογα με την τεχνική ή τον τύπο μηχανής προσθετικής κατασκευής που χρησιμοποιείται. Για παράδειγμα, στις τεχνολογίες που βασίζονται σε υλικό πούδρα, οι υποστηρίξεις δεν είναι απαραίτητες για τη σταθερότητα του εκτυπωμένου αντικειμένου, καθώς η ίδια η πούδρα λειτουργεί ως φυσική υποστήριξη κατά τη διαδικασία εκτύπωσης. [9]

Ένα από τα τελευταία στάδια πριν την εκτύπωση είναι η προετοιμασία του μηχανήματος η οποία αναφέρεται σε κατασκευαστικές παραμέτρους. Αυτό περιλαμβάνει τη ρύθμιση της παροχής υλικού, της ταχύτητας και των θερμοκρασιών. Οι περισσότερες μηχανές διαθέτουν προκαθορισμένες ρυθμίσεις για τη μείωση των σφαλμάτων. Στην συνέχεια η κατασκευή του αντικειμένου είναι κυρίως αυτοματοποιημένη διαδικασία που εκτελείται χωρίς επιτήρηση. Η μηχανή εκτελεί τη διαδικασία στρώμα με στρώμα, όπου το υλικό εναποτίθεται ή συγκολλάτε για να σχηματίσει το αντικείμενο. Η διαδικασία συνεχίζεται επαναλαμβανόμενα μέχρι την ολοκλήρωση.

Τέλος για την άριστη ποιότητα επιφάνειας η οποία διαφέρει από εκτυπωτή σε εκτυπωτή, είναι πιθανό να χρειαστεί επεξεργασία του αντικειμένου ανάλογα με τις ιδιότητες του υλικού. Αυτή μπορεί να περιλαμβάνει λειαντικό τρίψιμο, κατεργασία CNC, θερμική ή χημική επεξεργασία, ανάλογα με τις απαιτήσεις ώστε να έρθει το επιθυμητό αποτέλεσμα, όπως φαίνεται και στην σχήμα 1.2.3 που τα τελικά αντικείμενα χρειάζονται μετεπεξεργασία.



Σχήμα 1.2.3 *Μετεπεξεργασία τεμαχίων α) Αστάρι (Primer) για βελτίωση πρόσφυσης πριν το βάψιμο β) Μετεπεξεργασία με CNC φρέζα. [10]*

Γενικότερα, η προσθετική κατασκευή έχει αρκετά πλεονεκτήματα, ένα από τα πιο ξεχωριστά χαρακτηριστικά της είναι η δυνατότητα κατασκευής αντικειμένων με διαφορετικά υλικά, τόσο στο εσωτερικό όσο και στο εξωτερικό τους, όπως ανθεκτικά κεραμικά εξωτερικά και αγώγιμα μέταλλα εσωτερικά. Επιπλέον, υποστηρίζεται η κατασκευή εξαρτημάτων με μειωμένο βάρος, αφαιρώντας μη απαραίτητο υλικό από το εσωτερικό τους, γεγονός που καθιστά τη μέθοδο ιδιαίτερα χρήσιμη στους τομείς της αεροδιαστημικής και της αυτοκινητοβιομηχανίας, όπου το βάρος παίζει καθοριστικό ρόλο στη λειτουργικότητα.

Η ευελιξία στην παραγωγή μικρών ποσοτήτων προϊόντων είναι επίσης ένα μεγάλο πλεονέκτημα. Σε αντίθεση με τις συμβατικές μεθόδους, όπου το υψηλό κόστος εξοπλισμού αυξάνει το συνολικό κόστος παραγωγής, η προσθετική κατασκευή είναι πιο οικονομικά αποδοτική για μικρές σειρές προϊόντων, όπως εξατομικευμένα εμφυτεύματα και ακουστικά βαρηκοΐας, τα οποία συχνά κατασκευάζονται πλήρως με αυτή τη μέθοδο.

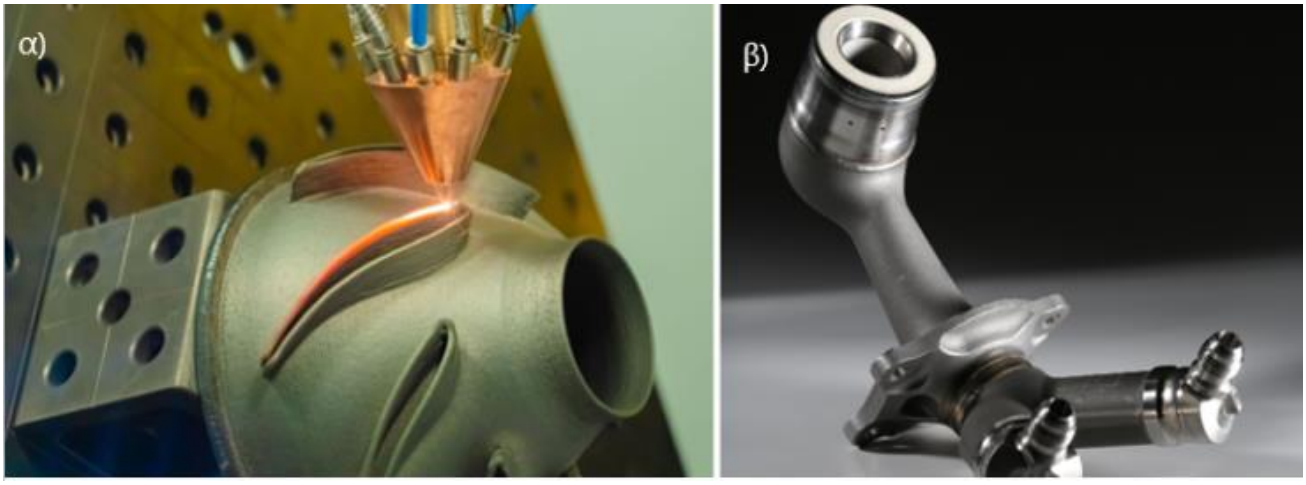
Ωστόσο, η προσθετική κατασκευή αντιμετωπίζει προκλήσεις. Αρκετές από τις μηχανές που χρησιμοποιούνται είναι ακριβές, και η παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων διαρκεί περισσότερο σε σχέση με τις παραδοσιακές μεθόδους. Επιπλέον, συχνά απαιτείται πρόσθετη επεξεργασία για τη βελτίωση της επιφάνειας των αντικειμένων όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Μια από τις μεγαλύτερες δυσκολίες είναι η διασφάλιση της ποιότητας και της αντοχής των παραγόμενων αντικειμένων, καθώς τα υλικά και οι παράμετροι εκτύπωσης επηρεάζουν την τελική απόδοση. Ειδικά για τα μεταλλικά μέρη, η λανθασμένη σύντηξη του υλικού μπορεί να οδηγήσει σε δομικά προβλήματα, ενώ στα πλαστικά, η ποιότητα εξαρτάται επίσης από την ακρίβεια της διαδικασίας. Η σχετική καινοτομία της προσθετικής κατασκευής αφήνει ακόμη περιθώρια για περαιτέρω έρευνα, ώστε να μειωθούν τα ελαττώματα και να βελτιωθεί η ποιότητα των τελικών προϊόντων. [11]

1.3 Εφαρμογές προσθετικής κατασκευής

Η τρισδιάστατη εκτύπωση αποτελεί μία από τις πλέον καινοτόμες τεχνολογίες της σύγχρονης εποχής, με ευρύ πεδίο εφαρμογών σε πολλούς τομείς της επιστήμης, της τεχνολογίας και της βιομηχανίας. Χάρη στη δυνατότητα γρήγορης και ακριβούς μετατροπής ψηφιακών μοντέλων σε φυσικά αντικείμενα, η τρισδιάστατη εκτύπωση προσφέρει εξαιρετική ευελιξία, ακρίβεια και αποδοτικότητα, ενώ επιτρέπει τη δημιουργία προϊόντων με σύνθετες γεωμετρίες και εξατομικευμένα χαρακτηριστικά.

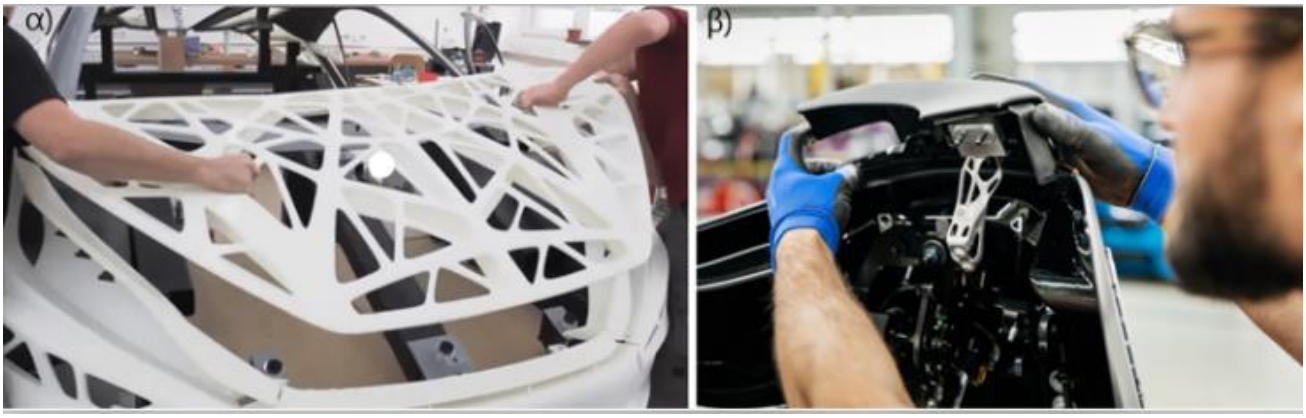
Η τεχνολογία αυτή διακρίνεται για τις σχεδόν «άπειρες» δυνατότητές της, αφού κάθε ιδέα μπορεί να υλοποιηθεί μέσω λογισμικού σχεδίασης και να εκτυπωθεί είτε ως ολοκληρωμένο προϊόν είτε ως ξεχωριστά εξαρτήματα που συνδυάζονται στη συνέχεια. Η χρήση διαφορετικών υλικών, η εξαιρετική διαστασιολογική ακρίβεια και η κατασκευή πολύπλοκων γεωμετριών ενισχύουν περαιτέρω τη χρησιμότητά της.

Έχει καθιερωθεί λοιπόν ως μία επαναστατική τεχνολογία, με εφαρμογές που επεκτείνονται σε πολλούς και διαφορετικούς τομείς. Στην αεροναυπηγική, για παράδειγμα, χρησιμοποιείται για την παραγωγή εξαρτημάτων υψηλής ακρίβειας, όπως πτερύγια τουρμπίνας και ακροφύσια καυσίμου (σχήμα 1.3.1), τα οποία συμβάλλουν στη μείωση του βάρους και την αύξηση της αποδοτικότητας των αεροσκαφών. Η τεχνολογία αυτή επιτρέπει, επίσης, την ταχύτερη ανάπτυξη πρωτοτύπων, δίνοντας τη δυνατότητα να δοκιμαστούν νέα σχέδια σε σύντομο χρονικό διάστημα.



Σχήμα 1.3.1 *α)Πτερύγιο τουρμπίνας και β)ακροφύσιο παροχής καυσίμου της GE Aviation.*

Αντίστοιχα, στην αυτοκινητοβιομηχανία, η τρισδιάστατη εκτύπωση αξιοποιείται για τη δημιουργία εξαρτημάτων από πλαστικά ή μέταλλα, τα οποία είναι ελαφριά, ανθεκτικά και προσαρμοσμένα στις απαιτήσεις της αγοράς. Η μείωση του κόστους και του χρόνου παραγωγής που επιτυγχάνεται μέσω της τρισδιάστατης εκτύπωσης συντελεί στη βελτίωση των οχημάτων, καθιστώντας τα πιο αποδοτικά και οικονομικά. Μέχρι σήμερα οι περισσότεροι κατασκευαστές δεν έχουν εισάγει ΑΜ κομμάτια στα μαζικής παραγωγής μοντέλα των αυτοκινήτων τους. Όμως βρίσκουν εξειδικευμένες εφαρμογές ώστε να εντοπίσουν σφάλματα στις γραμμές συναρμολόγησής, στην δημιουργία πρωτότυπων, βρίσκουν χρήση σε μικρής κλίμακας παραγωγές, στην παραγωγή ανταλλακτικών και σε άλλες καινοτομίες.



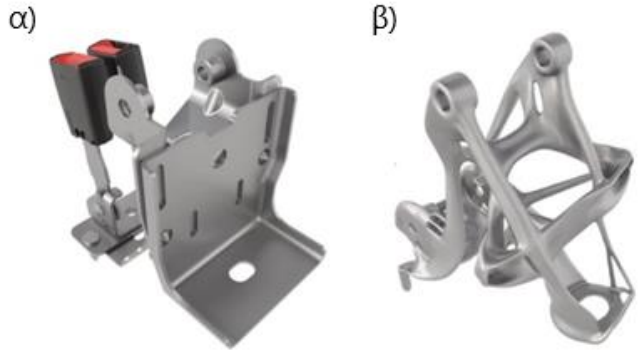
Σχήμα 1.3.2 α) *Δημιουργία πρωτότυπων και β) μηχανισμός οροφής του i8 Roadster της BMW.*

Αρκετοί είναι οι κατασκευαστές που έχουν εκδηλώσει ενδιαφέρον για την τρισδιάστατη εκτύπωση με σκοπό την ανάπτυξη τελικών εξαρτημάτων, επεκτείνοντας τις εφαρμογές πέρα από την δημιουργία ταχέων πρωτοτύπων (rapid prototyping). Οι λόγοι για αυτή την στροφή στο κομμάτι της παραγωγής συνοψίζονται στην αναζήτηση καινοτομίας προϊόντων σε ένα ανταγωνιστικό τομέα όπως η αυτοκινητοβιομηχανία. Ένα από τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα είναι δυνατότητα παραγωγής εξαρτημάτων με μικρότερο βάρος, συμβάλλοντας στη δημιουργία οχημάτων που καταναλώνουν λιγότερο καύσιμο. Εργαλεία όπως η τοπολογική βελτιστοποίηση

και η δημιουργία πλεγμάτων μειώνουν το συνολικό βάρος των εξαρτημάτων διατηρώντας ή ακόμη και βελτιώνοντας τη λειτουργικότητά τους.

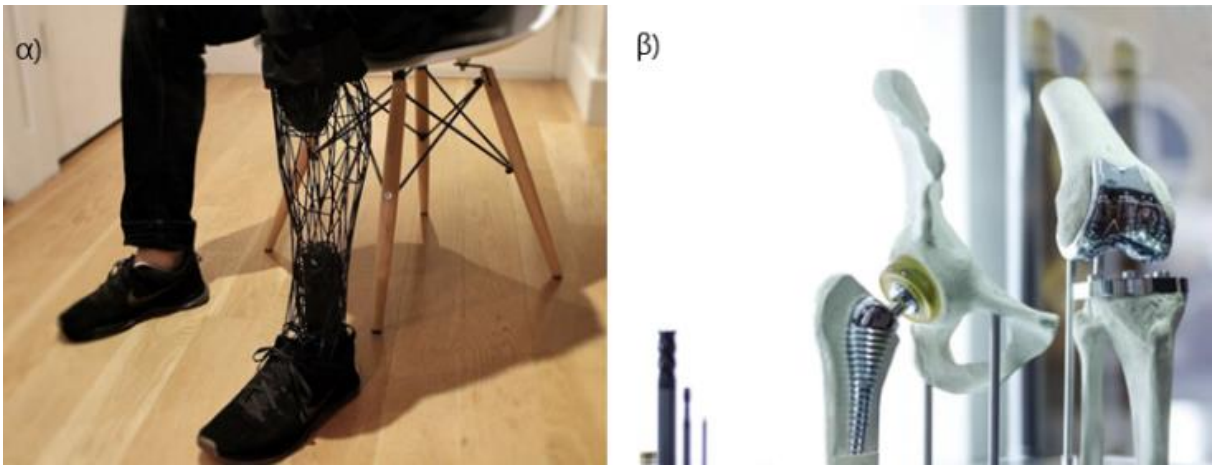
Τα ελαφρύτερα εξαρτήματα είναι συχνά πιο περίπλοκα. Ωστόσο, καθώς η προσθετική κατασκευή δεν έχει περιορισμούς ως προς την ελευθερία σχεδιασμού, σε αντίθεση με τις συμβατικές μεθόδους, η πολυπλοκότητα δεν αποτελεί πρόκληση. Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι η απλοποίηση των εξαρτημάτων είναι εφικτή χάρη στην AM, μέσω της ενοποίησης πολλαπλών εξαρτημάτων σε έναν ενιαίο σχεδιασμό. Έτσι, η πολυπλοκότητα της συναρμολόγησης μπορεί να μειωθεί μακροπρόθεσμα, εάν απαιτείται η παραγωγή μεγάλου όγκου τέτοιων εξαρτημάτων.

Ένα σημαντικό αποτέλεσμα της προσθετικής κατασκευής (AM) θα μπορούσε να είναι η μείωση και η απλοποίηση των τεράστιων εφοδιαστικών αλυσίδων που λειτουργούν σήμερα στον κλάδο της αυτοκινητοβιομηχανίας. Οι OEM (Original Equipment Manufacturer) συνεργάζονται με χιλιάδες προμηθευτές για την προμήθεια των διαφόρων εξαρτημάτων των αυτοκινήτων και αναζητούν συνεχώς τρόπους να βελτιστοποιήσουν τις εφοδιαστικές τους αλυσίδες. Επομένως, οι εταιρείες μπορούν να αξιοποιήσουν την AM για να μετασχηματίσουν τις εφοδιαστικές αλυσίδες τους, παράγοντας εξαρτήματα επί τόπου και μειώνοντας την ανάγκη για αποθέματα ανταλλακτικών. Όπως φαίνεται και στο παρακάτω (σχήμα 1.3.3), χρησιμοποιώντας generative design η General Motors κατάφερε να ενοποιήσει οκτώ διαφορετικά εξαρτήματα μιας βάσης καθίσματος σε ένα ενιαίο τρισδιάστατα εκτυπωμένο εξάρτημα.



Σχήμα 1.3.3 *α) Παραδοσιακά κατασκευασμένη βάση καθίσματος με πολλαπλή συνδεσμολογία β) Βάση καθίσματος κατασκευασμένη με προσθετική κατασκευή χωρίς συνδεσμολογία αντικειμένων.*

Στον τομέα της ιατρικής, η τρισδιάστατη εκτύπωση έχει φέρει επανάσταση, προσφέροντας λύσεις που δεν ήταν εφικτές με τις παραδοσιακές μεθόδους. Παράγονται εξατομικευμένα εμφυτεύματα, όπως κρανιακά ή ορθοπεδικά (σχήμα 1.3.4), τα οποία προσαρμόζονται στις ανάγκες του κάθε ασθενούς. Στην οδοντιατρική, χρησιμοποιείται για την κατασκευή γεφυρών, εμφυτευμάτων και άλλων εργαλείων, ενώ στον τομέα της αναγεννητικής ιατρικής εξελίσσεται η βιοεκτύπωση, η οποία επιδιώκει τη δημιουργία ζωντανών ιστών και οργάνων για μεταμοσχεύσεις.



Σχήμα 1.3.4 *Προσθετική κατασκευή σε α) πρόσθετο ποδιού και β) στον τομέα της ορθοπεδικής.*

Στον στρατιωτικό τομέα, η τρισδιάστατη εκτύπωση προσφέρει μοναδικά πλεονεκτήματα, καθώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ταχεία κατασκευή εξαρτημάτων, όπως ο εκτοξευτής χειροβομβίδων RAMBO (σχήμα 1.3.5), όπου όλα τα μέρη του εκτός από τα ελατήρια και τους συνδέσμους εκτυπώθηκαν τρισδιάστατα. Επιπλέον, η τρισδιάστατη εκτύπωση διευκολύνει τη γρήγορη ανάπτυξη νέου εξοπλισμού και την παραγωγή πρωτοτύπων για δοκιμές.



Σχήμα 1.3.5 *3d εκτυπωμένος εκτοξευτής χειροβομβίδων R.A.M.B.O.*

Συνολικά, η τρισδιάστατη εκτύπωση έχει αποδειχθεί ζωτικής σημασίας για πολλές βιομηχανίες, παρέχοντας ευελιξία σχεδιασμού, μείωση αποβλήτων και δυνατότητα κατασκευής σύνθετων γεωμετριών. Με την εξέλιξη της τεχνολογίας, νέες εφαρμογές συνεχώς αναδύονται, επιβεβαιώνοντας τη σπουδαιότητα και τις προοπτικές της.

1.4 Τεχνολογίες και υλικά προσθετικής κατασκευής

Η προσθετική κατασκευή (Additive Manufacturing) περιλαμβάνει μια σειρά από τεχνολογίες που διαφέρουν αρκετά ως προς τις μεθόδους, τα υλικά που χρησιμοποιούν και τις εφαρμογές τους. Προκειμένου να καλυφθούν οι ανάγκες για εκτύπωση πολύπλοκων μοντέλων και εφαρμογών σήμερα έχουν αναπτυχθεί 7 βασικές μέθοδοι προσθετικής κατασκευής οι οποίες καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα από βιομηχανικές εφαρμογές μέχρι και καταναλωτικά προϊόντα. [12]

Κύριες τεχνικές προσθετικής κατασκευής:

- Εξώθηση υλικού (material extrusion)
- Πολυμερισμός σε δεξαμενή (Vat photo- polymerization)
- Σύντηξη σε τράπεζα σκόνης (Powder bed fusion)
- Εκτόξευση υλικού (Material jetting)
- Εκτόξευση συνδετικού υλικού (Binder jetting)
- Εναπόθεση με κατευθυνόμενη ενέργεια (Directed energy deposition)
- Συγκόλληση φύλων (sheet lamination)

Κάθε τεχνολογία έχει μοναδικά πλεονεκτήματα και περιορισμούς, ανάλογα με τις ανάγκες της εφαρμογής και τα υλικά που χρησιμοποιούνται. Στα επόμενα κεφάλαια, θα γίνει ανάλυση ξεχωριστά στις 7 βασικές τεχνολογίες αλλά και στις πιο δημοφιλής μεθόδους που χρησιμοποιούνται για την επίτευξη τρισδιάστατης εκτύπωσης, με στόχο την κατανόηση των χαρακτηριστικών και των δυνατοτήτων τους.(*The 7 categories of Additive Manufacturing*, χ.χ.), [14]

Όσο αναφορά τα υλικά, οι ιδιότητες πολλές φορές διαμορφώνονται ταυτόχρονα με την γεωμετρία του εξαρτήματος. Το αρχικό υλικό έχει προφανώς τον βασικό ρόλο (π.χ. η χημική σύνθεση του πολυμερούς ή το μέγεθος και η κατανομή των σωματιδίων μεταλλικής σκόνης), αλλά και οι παράμετροι της διαδικασίας επηρεάζουν χαρακτηριστικά όπως η αντοχή, η ελαστικότητα, η πορώδης δομή και η επιφανειακή ποιότητα του τελικού αντικειμένου. Όταν οι ιδιότητες του υλικού καθορίζονται μαζί με τη γεωμετρία, γίνεται δυνατό να

ελέγχονται σκόπιμα και με ακρίβεια σε συγκεκριμένες περιοχές του εξαρτήματος — να προσδίδονται χαρακτηριστικά όπως πορώδες, ακαμψία ή ευκαμψία. [15]

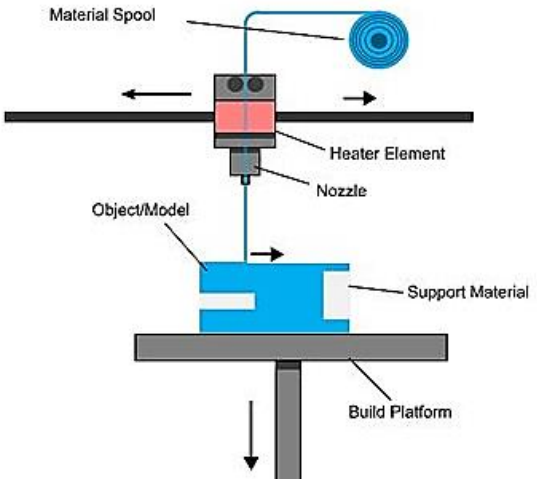
Οι κύριες κατηγορίες υλικών που χρησιμοποιούνται σήμερα είναι:

- **Πολυμερή**: Χωρίζονται σε θερμοπλαστικά που βρίσκουν εφαρμογή πιο συχνά σε συστήματα που χρησιμοποιούν νήμα (PLA, ABS) και θερμοσκληρόμενα πλαστικά που χρησιμοποιούνται κυρίως στις τεχνολογίες που βασίζονται στον φωτοπολυμερισμό (ρητίνες).
- **Μέταλλα**: Περιλαμβάνονται υλικά όπως το αλουμίνιο, το τιτάνιο, ο ανοξείδωτος χάλυβας κ.α.. Τα μέταλλα στην προσθετική κατασκευή παρέχοντα σε μορφή νήματος ή σκόνης, άλλα μπορούν να αναμειχθούν και με άλλα υλικά όπως πολυμερή.
- **Σύνθετα υλικά**: Το σύνθετο μπορεί να δημιουργείται κατά τη διαδικασία εκτύπωσης ή να ξεκινά από υλικό που περιλαμβάνει ήδη ένα πρόσθετο. Τα πολυμερή σύνθετα υλικά μπορούν να γίνουν τόσο ανθεκτικά ώστε να αποτελέσουν εναλλακτική λύση στα μέταλλα, συχνά με σημαντική εξοικονόμηση βάρους.
- **Κεραμικά**: Έχουν χαμηλή απορροφητικότητα και είναι δύσκολο να εκτυπωθούν, ωστόσο έχουν αναπτυχθεί λύσεις που βασίζονται σε εξώθηση, υλική εκτόξευσή (Material jetting) και φωτοπολυμερισμό.
- **Άμμος**: Μπορεί να εκτυπωθεί τρισδιάστατα μέσω της μεθόδου Binder Jetting, επιλέγοντας να «κολλήσει» τους κόκκους μεταξύ τους. Αυτή η τεχνική εξελίσσεται γρήγορα τόσο για πρωτότυπα όσο και για παραγωγή καλουπιών χυτηρίου, καθώς και για κατασκευή εργαλείων όπως καλούπια κενού και άλλες εφαρμογές. [16]

1.4.1 Εξώθηση υλικού (Material extrusion)

Η εξώθηση υλικού είναι μια από τις κύριες μεθόδους προσθετικής κατασκευής, κυρίως γνωστή μέσω της τεχνολογίας Fused Deposition Modeling (FDM). Η εκτύπωση τριών διαστάσεων FDM είναι μια διαδικασία κατά την οποία το υλικό σε μορφή νήματος διοχετεύεται μέσω ενός θερμαινόμενου ακροφυσίου και στην συνέχεια γίνεται τήξη πολυμερών υλικών σε στρώσεις. Κάθε ένα στρώμα εναποτίθενται στην πλατφόρμα κατασκευής συνεχώς σε επίπεδο επί επίπεδο στο σημείο που ορίζεται από το ψηφιακό σχέδιο CAD δημιουργώντας τελικά το 3d μοντέλο. Τα στρώματα στερεοποιούνται, προκαλώντας την σύνδεση με το από κάτω τους στρώμα σχηματίζοντας την επιθυμητή δομή.

Συγκεκριμένα, το νήμα αντλείται από ένα κύλινδρο μέσα από ένα γρανάζι κίνησης του κεντρικού εξωθητή. Το άκρο (κεφαλή) του ακροφυσίου θερμαίνει το υλικό και το γρανάζι περιστρέφεται ενεργοποιώντας και απενεργοποιώντας τη ροή του υλικού. Υπάρχουν επίσης και βοηθητικοί κινητήρες (steppers) που χρησιμοποιούνται για να περιστροφή του γραναζιού κίνησης και να ρυθμιστεί η απόθεση. Το ακροφύσιο κινείται στον άξονα x, y ενώ η πλατφόρμα κατασκευής στον z κατά την διαδικασία κατασκευής του αντικειμένου. Στο σχήμα 1.4.1.1 παρουσιάζονται ονομαστικά τα βασικά μέρη του εκτυπωτή FDM.



Σχήμα 1.4.1.1 *FDM technology. [17]*

Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα αυτής της τεχνολογίας είναι το κόστος καθώς ο εξοπλισμός και τα υλικά είναι σχετικά φθηνά, καθιστώντας την προσιτή σε ερευνητές, εκπαιδευτικά ιδρύματα, και σε ερασιτέχνες. Επιπλέον, η δυνατότητα χρήσης διαφορετικών τύπων θερμοπλαστικών, όπως το PLA, ABS, και σύνθετα υλικά, διευρύνει τη χρήση της σε ποικίλες εφαρμογές, από την ταχεία πρωτοτυποποίηση έως την κατασκευή τελικών προϊόντων.

Ωστόσο, υπάρχουν και ορισμένα μειονεκτήματα που περιορίζουν την απόδοσή της μεθόδου, και ένα από αυτά είναι η ποιότητα της επιφάνειας των αντικειμένων. Συχνά επηρεάζεται από την ορατότητα των στρώσεων, ενώ η συνοχή μεταξύ τους είναι μία από τις κύριες αδυναμίες, οδηγώντας σε χαμηλότερες μηχανικές αντοχές σε σύγκριση με παραδοσιακές μεθόδους κατασκευής.

Παρά τις προκλήσεις η τεχνολογία FDM εξελίσσεται συνεχώς, με την έρευνα να εστιάζει σε υλικά υψηλών επιδόσεων και σε μεθόδους που ενισχύουν τη συνοχή και τη δομική ακεραιότητα, δημιουργώντας έτσι μεγαλύτερο φάσμα λειτουργιών. [18], [14]

Υλικά

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι ή μέθοδος αυτή εστιάζει περισσότερο στην εξώθηση θερμοπλαστικών υλικών και σύνθετων υλικών με βάση τα θερμοπλαστικά. Γενικότερα, όπως έχει αναφερθεί παραπάνω τα πολυμερή διαχωρίζονται σε δύο κατηγορίες τα θερμοπλαστικά και τα θερμοσκληρόμενα. Στην τεχνολογία FDM χρησιμοποιούνται αποκλειστικά θερμοπλαστικά πολυμερή, εφόσον βασίζεται στο λιώσιμο (εξώθηση) και την αναδιαμόρφωση του υλικού αναπτύσσοντας το τελικό αντικείμενο.

Η επιλογή του υλικού εξαρτάται από την εφαρμογή, τις μηχανικές ιδιότητες, την περιβαλλοντική αντίσταση και την ευκολία της εκτύπωσης. Στην αγορά αλλά και σε ερευνητικά άρθρα δίνονται ξεκάθαρες λεπτομέρειες για τα χαρακτηριστικά κάθε υλικού που παρουσιάζονται στον πίνακα 1.4.1.1, καθιστώντας ευκολότερη την επιλογή του κατάλληλου για συγκεκριμένες ανάγκες.

Υλικά	**Ιδιότητες**	**Εφαρμογές**
Standard thermoplastics		
PLA	• Χαμηλή θερμική αντοχή • Χαμηλή μηχανική αντίσταση • Άκαμπτο	Πρωτότυπα, διακοσμητικά αντικείμενα, εκπαιδευτικά μοντέλα.
ABS	• Ανθεκτικό και αντοχή σε πρόσκρουση • Υψηλή αντοχή σε θερμότητα • Καλή μηχανική αντίσταση	Λειτουργικά πρωτότυπα, εξαρτήματα αυτοκινήτου, καθημερινά αντικείμενα.
PETG	• Υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό και κάμψη • Μέτρια θερμική αντοχή(<ABS) • Καλή χημική αντίσταση	Μηχανικά μέρη, εξαρτήματα με απαιτήσεις αντοχής, κατάλληλο για εφαρμογές που σχετίζονται με τρόφιμα και χημικά
Flexible Materials		
TPU, TPE	• Εξαιρετικά ελαστικό • Υψηλή αντοχή σε κρούση • Επιλογές σκληρότητας 60A – 95A • Υψηλή αντοχή σε φθορά • Περιορισμένη αντοχή στην θερμοκρασία (έως 80 ^{O}C)	Προστατευτικές θήκες, εφαρμογές με στόχο την απορρόφηση κραδασμών (σόλες παπουτσιών),ιατρικές εφαρμογές (προστατευτικά, βιοσυμβατά εξαρτήματα)
Engineering thermoplastics and high-performance Plastics		
Nylon, PC, PP, POM, PEEK, PEI / (ULTEM),	• Εξαιρετική μηχανική αντοχή • Καλή χημική σταθερότητα • Ανθεκτικά σε καταπονήσεις και τριβή	Μηχανικά εξαρτήματα (γρανάζια), χρήση στην αυτοκινητοβιομηχανία, αεροδιαστημική, προστατευτικά μέρη, συστήματα μετάδοσης κίνησης, εξαρτήματα κινητήρα

	• Καλή αντοχή σε θερμοκρασία (100 ^{o}C – 170 ^{o}C)	
Composite Materials		
Carbon fiber reinforced (ABS CF, PET CF, NYLON CF) Glass-Fiber Reinforced	• Αυξημένη ακαμψία και αντοχή • Ελαφρύτερο • Υψηλή θερμική αντοχή και διαστατική σταθερότητα	Ελαφριά και ανθεκτικά εξαρτήματα σε τομείς της αυτοκινητοβιομηχανία και αεροδιαστημικής, αθλητικός εξοπλισμός (εξαρτήματα ποδηλάτων, κράνη), εξαρτήματα ρομποτικής
Metal-filled filaments (σωματίδια μετάλλου όπως ανοξείδωτο ατσάλι, αλουμίνιο)	• Αυξημένη ακαμψία • Δομική σταθερότητα • Βελτίωση αντοχής σε θερμοκρασία	Δημιουργία εργαλείων ή μηχανικών μερών.
Κεραμικά (σωματίδια όπως αλουμίνα, ζιργκόν, καολίνη)	• Χημική σταθερότητα • Υψηλή αντοχή στη θερμότητα	Οδοντιατρικές εφαρμογές, κατασκευή πιεζοηλεκτρικών εξαρτημάτων.

Πίνακας 1.4.1.1 *Υλικά-ιδιότητες-εφαρμογές της τεχνολογίας FDM. [14]*

1.4.2 Πολυμερισμός σε δεξαμενή (Vat photo-polymerization)

Οι διεργασίες φωτοπολυμερισμού χρησιμοποιούν υγρά υλικά, ρητίνες που στερεοποιούνται όταν ακτινοβοληθούν ή φωτοπολυμερή. Τα φωτοπολυμερή αναπτύχθηκαν κατά το τέλος της δεκαετίας του 1960 και χρησιμοποιήθηκαν για εμπορικούς σκοπούς, κυρίως στην βιομηχανία παραγωγής υλικών επιστρώσεων και της τυπογραφίας.

Υπάρχουν πέντε βασικές μέθοδοι για την επίτευξη του φωτοπολυμερισμού:

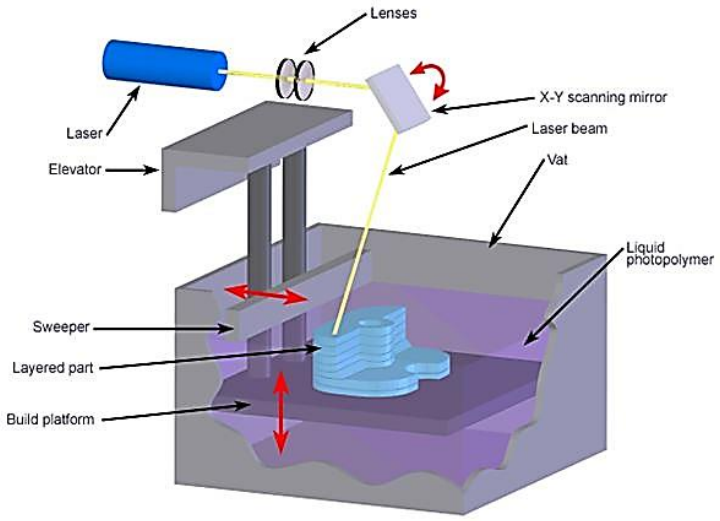
- stereolithography (SLA)
- Digital light processing (DLP)
- Two -photon polymerization (TPP)
- Liquid crystal display (LCD)
- Continuous liquid interface production (CLIP)

Η στερεολιθογραφία (SLA) είναι μία από τις πρώτες και πιο ακριβείς τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής. Αναπτύχθηκε τη δεκαετία του 1980 από τον Chuck Hull, ιδρυτή της 3D Systems, και βασίζεται στη μέθοδο φωτοπολυμερισμού, όπου ένα υγρό φωτοπολυμερές στερεοποιείται μέσω έκθεσης σε υπεριώδες (UV) φως.

Ο εκτυπωτής διαθέτει μια βάση η οποία τοποθετείται μέσα σε μια διαφανή δεξαμενή και γεμίζεται με υγρή ρητίνη η οποία στερεοποιείται με την χρήση φωτός. Αυτό γίνεται καθώς το φως λέιζερ εστιάζει σε συγκεκριμένα σημεία και στειροποιεί την ρητίνη δημιουργώντας μια συμπαγή δομή. Στο (σχήμα 1.4.2.1) παρουσιάζονται κάποια βασικά μέρη του εκτυπωτή για καλύτερη κατανόηση.

Σαν μέθοδος, η στερεολιθογραφία είναι αρκετά ακριβής και χρησιμοποιείται για την διαμόρφωση αρκετά περίπλοκων γεωμετριών. Η δέσμη λέιζερ κατευθύνεται στο άξονα x και y κατά μήκος και αφού δημιουργήσει το επίπεδο η πλατφόρμα κατασκευής χαμηλώνει στον άξονα z (εάν είναι top-down) για να σχηματιστεί το επόμενο στρώμα και το εξάρτημα – μοντέλο να δημιουργηθεί.

Για τα περισσότερα μέρη μιας κατασκευής με την μέθοδο αυτή απαιτούνται δομές υποστήριξης, λόγω και της μεγάλης ακρίβειας που διαθέτει στις περίπλοκες δομές. Μετά το τέλος της εκτύπωσης τα μέρη καθαρίζονται με ισοπροπανόλη και στην συνέχεια τοποθετούνται σε έναν θάλαμο με υπεριώδη ακτινοβολία ώστε να σκληρύνουν και να γίνουν ποιο συμπαγή. Αφού περάσει ο χρόνος έκθεσης στην ακτινοβολία (ανάλογα το είδος ρητίνης), γίνεται αφαίρεση των υποστηρίξεων και οποιαδήποτε άλλη κατεργασία χρειαστεί για το επιθυμητό αποτέλεσμα. [14], [19]



Σχήμα 1.4.2.1 *SLA technology. [20]*

Υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες εκτυπωτών SLA που διακρίνονται ανάλογα με τη διάταξη της πλατφόρμας κατασκευής (build plate): οι εκτυπωτές Top-down και οι Bottom-up.

Top-down: Σε αυτήν την τεχνολογία, η πηγή λέιζερ βρίσκεται στο επάνω μέρος του εκτυπωτή και κατευθύνει τη δέσμη φωτός προς την επιφάνεια της υγρής ρητίνης. Όταν στερεοποιηθεί το πρώτο στρώμα, η πλατφόρμα κατασκευής κατεβαίνει ελαφρώς, αφήνοντας χώρο για τη ροή της νέας στρώσης υγρής ρητίνης, η οποία στη συνέχεια στερεοποιείται με τον ίδιο τρόπο. Στο τέλος της διαδικασίας, η πλατφόρμα ανεβαίνει πλήρως, ώστε το αντικείμενο να μπορεί να αφαιρεθεί. Αυτού του είδους οι εκτυπωτές είναι ιδανικοί για τη δημιουργία μεγάλων αντικειμένων, καθώς η βαρύτητα βοηθά στη φυσική σταθεροποίηση των δομών. Ωστόσο, απαιτούν μεγαλύτερες ποσότητες ρητίνης, γεγονός που τους καθιστά πιο δαπανηρούς. Χρησιμοποιούνται συνήθως σε βιομηχανικά περιβάλλοντα και ερευνητικά εργαστήρια λόγω των δυνατοτήτων κατασκευής μεγάλου όγκου και των υψηλών απαιτήσεων ακρίβειας.

Bottom-up: Σε αυτήν την κατηγορία, η πηγή φωτός βρίσκεται κάτω από τη δεξαμενή ρητίνης, η οποία καλύπτεται από μια διαφανή μεμβράνη με επικάλυψη σιλικόνης. Το φως περνά μέσα από τον πάτο της δεξαμενής και στερεοποιεί τη ρητίνη στρώμα προς στρώμα. Μετά τη στερεοποίηση κάθε στρώσης, η πλατφόρμα ανεβαίνει ελαφρώς, ώστε να αποκολληθεί η στερεοποιημένη ρητίνη από τον πάτο της δεξαμενής σε μια διαδικασία γνωστή ως "peeling step". Κατόπιν, η πλατφόρμα κατεβαίνει ξανά σε σχεδόν αρχική θέση για να συνεχιστεί η διαδικασία. Αυτή η μέθοδος είναι εξαιρετικά αποδοτική για μικρές κατασκευές και χρησιμοποιείται ευρέως σε επιτραπέζιους εκτυπωτές SLA (desktop SLA printers). Ωστόσο, η σταθερότητα του αντικειμένου μπορεί να επηρεαστεί σε μεγάλα ή βαριά μοντέλα, καθώς το βάρος του προϊόντος στηρίζεται αποκλειστικά στην πλατφόρμα εκτύπωσης.

Οι εκτυπωτές Top-down υπερέχουν σε εφαρμογές που απαιτούν μεγάλα μεγέθη και αυξημένη ανθεκτικότητα, ενώ οι Bottom-up είναι ιδανικοί για πιο οικονομικές και ευέλικτες λύσεις, κυρίως σε μικρότερους χώρους, όπως εργαστήρια και οικιακές εφαρμογές. Καθένας από αυτούς διαθέτει συγκεκριμένα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που τον καθιστούν κατάλληλο για διαφορετικές ανάγκες παραγωγής. [19]

Υλικά

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στην στερεολιθογραφία μπορούν να ομαδοποιηθούν σε τέσσερίς κατηγορίες:

- Standard SLA resins (τυπικές ρητίνες): Οι τυπικές ρητίνες είναι αρκετά οικονομικές και αποδοτικές, που μπορούν με αυτές να επιτευχθούν άκαμπτες, υψηλής ποιότητας εκτύπωσης με ομαλή επιφάνεια.
- Engineering SLA resins (ρητίνες με καλές μηχανικές ιδιότητες): Οι μηχανικές ρητίνες SLA έχουν σχεδιαστεί ειδικά για εξαρτήματα και πρωτότυπα που προσομοιάζουν πλαστικά εξαρτήματα από χύτευση με έγχυση. Απαιτούν μεταγενέστερη σκλήρυνση υπό υπεριώδες (UV) φως, για την επίτευξη βέλτιστων μηχανικών ιδιοτήτων.

- Castable resins (ρητίνες που χρησιμοποιούνται για χύτευση): Οι ρητίνες χύτευσης είναι ιδιαίτερα ευέλικτα υλικά, σχεδιασμένα ειδικά για εφαρμογές τρισδιάστατης εκτύπωσης στη βιομηχανία κοσμημάτων. Αυτού του τύπου οι ρητίνες μπορούν να δημιουργήσουν περίπλοκες λεπτομέρειες και λείες επιφάνειες, ικανοποιώντας τα υψηλά πρότυπα που απαιτούνται στην κατασκευή κοσμημάτων.
- Dental and medical SLA resins (Οδοντιατρικές και Ιατρικές Ρητίνες): Χωρίζονται σε δυο υποκατηγορίες, στην κατηγορία 1 (custom medical appliances resin) που χρησιμοποιούνται στην παραγωγή ιατρικών συσκευών και εργαλείων και στην κατηγορία 2 (dental long-term biocompatible resin) που χρησιμοποιούνται για ορθοδοντικές και μακροχρόνιες οδοντιατρικές εφαρμογές.

Παρακάτω παρουσιάζεται ο πίνακας 1.4.2.1 με τις κατηγορίες υλικών κάποιες ιδιότητες αλλά και τις εφαρμογές που βρίσκουν σε διάφορους τομείς.

Υλικά	**Ιδιότητες**	**Εφαρμογές**
Standard resin (τυπική ρητίνη)	• Μέτρια αντοχή σε εφελκυσμό (40-60 Mpa) • Μέτρια αντοχή στην θερμοκρασία (50 -70 ^{o}C) • Καλή επιφάνεια • Περιορισμένες μηχανικές ιδιότητες	Πρωτότυπα, διακοσμητικά – οπτικά μοντέλα, εφαρμογές με χαμηλό φορτίο)
Engineering resins		
Tough and durable resin (ανθεκτική ρητίνη)	• Αντοχή σε κρούση • Υψηλή αντοχή σε κάμψη (80-110 MPa) • Επιμήκυνση θραύσης (25-50%)	Λειτουργικά πρωτότυπα, εργαλεία, εξαρτήματα μηχανισμών – ανταλλακτικά.
High-temperature resin (ρητίνη υψηλής θερμοκρασίας)	• Θερμική αντοχή έως 280^{o}C • Αντοχή σε εφελκυσμό (70-90 MPa) • Εύθραυστη σε υψηλές μηχανικές καταπονήσεις	Παραγωγή καλουπιών, χρήση σε τομείς της αυτοκινητοβιομηχανίας, εξαρτήματα για υψηλές θερμοκρασίες.
Flexible resin (ελαστική ρητίνη)	• Σκληρότητα shore 30A-90A • Επιμήκυνση θραύσης 50-300% • Αντοχή σε κάμψη	Λαβές – grips, εφαρμογές στην ρομποτική, ανατομικά μοντέλα κ.α.
Ceramic- filled resin	• Υψηλή θερμική σταθερότητα • Αντοχή σε φθορά • Θερμική αντοχή έως 200^{o}C	Ανθεκτικά εξαρτήματα, εισαγωγές καλουπιών κ.α.
Castable resins		
Standard castable resin	• Υψηλή ανάλυση • Ελαφρώς εύθραυστη • Χαμηλή επιμήκυνση	Χύτευση κοσμημάτων, οδοντιατρικές στεφάνες και γέφυρες κ.α.
High-temperature castable resin (ρητίνη χύτευσης υψηλής θερμοκρασίας)	• Υψηλή θερμική αντίσταση • Καθαρό κάψιμο • Εύθραυστη	Βιομηχανικές χυτεύσεις, μηχανικά εξαρτήματα, μεγάλα κοσμήματα
Wax-Based Castable Resin (Ρητίνη Χύτευσης με Κερί)	• Ελαστικότητα • Βελτιωμένη απόδοση στην χύτευση • Καθαρό κάψιμο	Υψηλής ακρίβειας κοσμήματα, περιπλοκά μεταλλικά εξαρτήματα
Dental and medical resins		
Biocompatible Resin (Βιοσυμβατή Ρητίνη), Dental Resin (Οδοντιατρική Ρητίνη)	• Αποστειρώσιμο • Υψηλή ακρίβεια • Βιοσυμβατότητα	Προσθετικά μέλη. Χειρουργική οδηγοί, ορθοδοντικά μοντέλα κ.α.

Πίνακας 1.4.2.1 *Υλικά-ιδιότητες-εφαρμογές τεχνολογίας SLA. [21]*

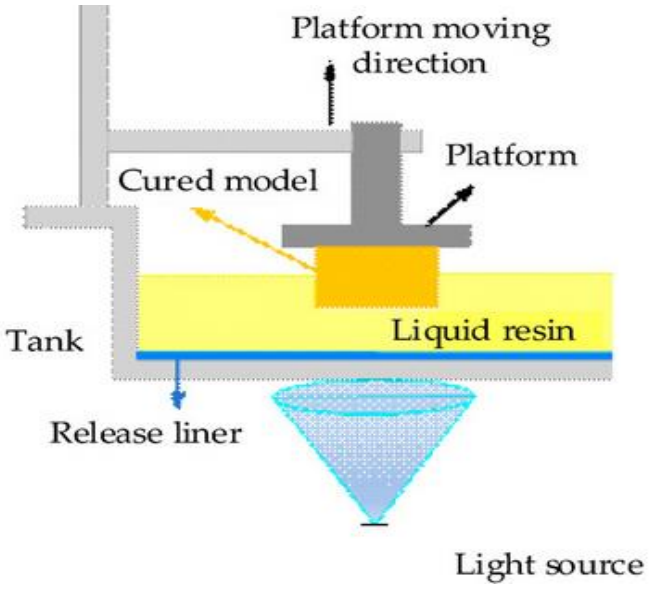
1.4.3 Digital light processing (DLP)

Η τεχνολογία DLP (Digital Light Processing) αποτελεί εξέλιξη των εκτυπωτών SLA (Stereolithography), με την κύρια διαφοροποίηση να εντοπίζεται στην πηγή φωτός που χρησιμοποιείται για τη στερεοποίηση της ρητίνης. Αντί για λέιζερ που διαγράφει το περίγραμμα κάθε στρώσης μέσω κίνησης, όπως στους εκτυπωτές SLA, οι εκτυπωτές DLP προβάλλουν ολόκληρη την εικόνα κάθε στρώσης χρησιμοποιώντας έναν ψηφιακό προβολέα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη στερεοποίηση ολόκληρης της επιφάνειας της ρητίνης ταυτόχρονα, επιταχύνοντας σημαντικά τη διαδικασία εκτύπωσης.

Η ταχύτητα αυτή καθιστά τους εκτυπωτές DLP ιδανικούς για την παραγωγή αντικειμένων με σύνθετες γεωμετρίες και λεπτές δομές. Συχνά κυκλοφορούν στην αγορά σε μορφή επιτραπέζιων συσκευών (desktop), ακολουθώντας την αρχή λειτουργίας **Bottom-up** (η πλατφόρμα κινείται προς τα πάνω μετά από κάθε στρώση). Η συγκεκριμένη τεχνολογία είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την ταχεία εκτύπωση πρωτοτύπων (rapid prototyping), κάτι που την καθιστά ιδανική για εφαρμογές όπως ο σχεδιασμός προϊόντων και η κατασκευή κοσμημάτων.

Ένα από τα κύρια μειονεκτήματα της DLP τεχνολογίας αφορά το κόστος των εκτυπωτών, καθώς ο ψηφιακός προβολέας αποτελεί ένα από τα ακριβότερα μέρη του εξοπλισμού. Επιπλέον, η ποιότητα της εκτύπωσης εξαρτάται άμεσα από την ανάλυση του προβολέα, καθώς η εικόνα κάθε στρώσης αποτελείται από pixel (εικονοστοιχεία). Ένας προβολέας χαμηλής ανάλυσης μπορεί να οδηγήσει σε λιγότερο ομαλές επιφάνειες, απαιτώντας τη χρήση προβολέα υψηλότερης ανάλυσης για εκτυπώσεις υψηλής ποιότητας, γεγονός που αυξάνει το συνολικό κόστος.

Ένα ενδιαφέρον πλεονέκτημα της DLP τεχνολογίας είναι η δυνατότητα εκτύπωσης πολλαπλών αντικειμένων ταυτόχρονα, χωρίς αύξηση του χρόνου παραγωγής, αφού κάθε στρώση προβάλλεται ολόκληρη. Επιπλέον, χάρη στη γρήγορη στερεοποίηση, η DLP τείνει να έχει μικρότερη κατανάλωση ρητίνης σε σχέση με την SLA, μειώνοντας το λειτουργικό κόστος σε ορισμένες περιπτώσεις.



Σχήμα 1.4.3.1 *DLP technology.[22]*

Υλικά

Στην μέθοδο DLP χρησιμοποιούνται παρόμοιες ρητίνες με την μέθοδο SLA, και στην αγορά υπάρχουν πολλές συμβατές και με τις δύο μεθόδους. Όμως υπάρχουν και εξαιρέσεις εφόσον ρητίνες που χρησιμοποιούνται μόνο στην μέθοδο DLP παρουσιάζουν διαφορές στην πυκνότητα (ιξώδες), την απόδοση και την ταχύτητα πολυμερισμού.

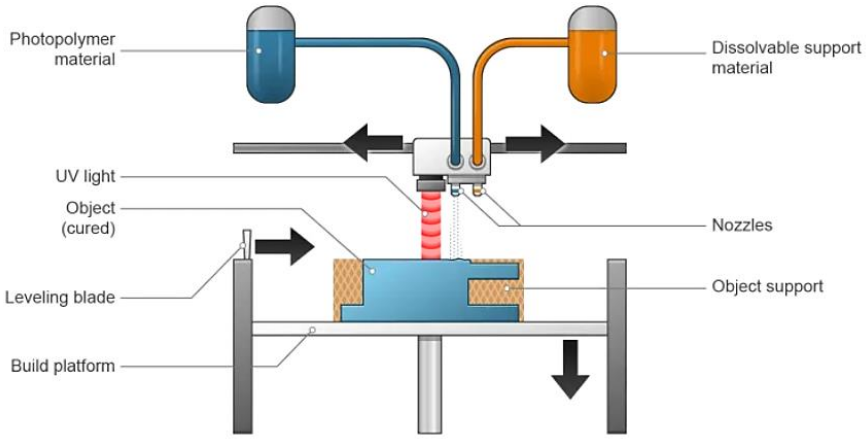
Γενικότερα στην μέθοδο DLP και SLA χρησιμοποιούνται ρητίνες συμβατές, αλλά υπάρχουν και κατηγορίες οι οποίες είναι βελτιστοποιημένες για κάθε τεχνολογία ξεχωριστά. Πιο συγκεκριμένα για τις ρητίνες στην μέθοδο DLP, επειδή ο προβολέας ταυτόχρονα πολυμερίζει ολόκληρη τη στρώση, η ρητίνη θα πρέπει να έχει χαμηλό ιξώδες (πυκνότητα) ώστε να ρέει γρήγορα και ομοιόμορφά πάνω στο build plate καλύπτοντας την επιφάνεια πριν την επόμενη έκθεση στο φως για να δημιουργηθεί μια ομοιόμορφη στρώση.[23]

1.4.4 Εκτόξευση Υλικού (Material jetting)

Η τεχνολογία εκτόξευσης υλικού (Material jetting) αποτελεί μια μέθοδο τρισδιάστατης εκτύπωσης που χρησιμοποιεί μια σειρά από ακροφύσια για την εναπόθεση σταγονιδίων υλικού σε μία επιφάνεια. Τα σταγονίδια αυτά στερεοποιούνται για να σχηματίσουν λεπτές στρώσεις, οι οποίες, όταν συνδυαστούν, δημιουργούν το τελικό αντικείμενο. Η διαδικασία βασίζεται σε μια προσεκτικά ελεγχόμενη ροή υλικού από ακροφύσια υψηλής ακρίβειας, τα οποία μπορούν να δουλέψουν ταυτόχρονα σε μεγάλες δισδιάστατες επιφάνειες, επιταχύνοντας τη διαδικασία κατασκευής.

Τα σταγονίδια εναποτίθενται συστηματικά πάνω σε μία βάση, σχηματίζοντας στρώσεις που διαμορφώνουν το αντικείμενο. Κάθε στρώση, αφού τοποθετηθεί, στερεοποιείται άμεσα μέσω υπεριώδους (UV) ακτινοβολίας, εξασφαλίζοντας τη σταθερότητα της κατασκευής και την ακριβή προσθήκη της επόμενης στρώσης.

Η επαναληπτική αυτή διαδικασία επιτρέπει τη δημιουργία τρισδιάστατων αντικειμένων με υψηλή λεπτομέρεια και μεγάλη γεωμετρική ακρίβεια. Παράλληλα, η δυνατότητα χρήσης πολλών υλικών και χρωμάτων κατά τη διάρκεια της εκτύπωσης προσφέρει ευελιξία και πλεονεκτήματα σε ποικίλες εφαρμογές. Τα αποτελέσματα διακρίνονται για την ποιότητα των επιφανειών, χωρίς να απαιτούνται εκτεταμένες διαδικασίες φινιρίσματος.



Σχήμα 1.4.4.1 *Material Jetting technology. [24]*

Στην τεχνολογία Material Jetting υπάρχουν διάφορες τεχνικές και παραλλαγές που επηρεάζουν την διαδικασία εκτύπωσης, τις ιδιότητες που θα έχει το παραγόμενο αντικείμενο και τις εφαρμογές. Επιπλέον υπάρχουν διαφορές στον τρόπο εναπόθεσης σταγονιδίων με θερμικούς επενεργητές (bubble jet) και πιεζοηλεκτρικούς επενεργητές. [25], [26]

Παρακάτω θα αναφερθούν ορισμένες τεχνολογίες Material Jetting:

- **Polyjet Technology**, η μέθοδος αυτή βασίζεται στην χρήση πολλών ακροφυσίων για την ταυτόχρονη εναπόθεση υλικού. Διακρίνεται για την ικανότητα εκτύπωσης πολλαπλών υλικών προσφέροντας ποικιλία μηχανικών ιδιοτήτων και χρωμάτων.
- **Drop-on-Demant (DoD)**, η μέθοδος αυτή εστιάζει στην ελεγχόμενη εναπόθεση σταγονιδίων στοχεύοντας στις περιοχές όπου χρειάζεται υλικό, με σκοπό την μείωση σπατάλης υλικού. Είναι ιδανική για εφαρμογές υψηλής ακρίβειας, όπως η εκτύπωση λεπτών στρωμάτων σε σύνθετες γεωμετρίες.
- **NanoParticle Jetting (NPJ) by XJet**, η μέθοδος αυτή προσαρμόζεται για την εκτύπωση υλικών υψηλού ιξώδους, όπως είναι κεραμικά ή μεταλλικά σωματίδια αναμεμειγμένα με φωτοπολυμερή. Απευθύνεται σε βιομηχανικές εφαρμογές που απαιτούν αυξημένη αντοχή ή ειδικές ιδιότητες

Υλικά

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στην τεχνολογία Material Jetting (MJ) ονομάζονται jettable inks. Τα υλικά αυτά έχουν ιδιαίτερα χαρακτηριστικά όπως χαμηλό ιξώδες ώστε να διευκολύνεται η ομαλή ροή και η

εκτόξευση. Συγκεκριμένα η μέγιστη συνεκτικότητα του υλικού προκειμένου να εκτυπωθεί, θεωρείται ότι είναι μεταξύ 20 – 40 cp (centipoise) στη θερμοκρασία εκτύπωσης.

Προκειμένου να είναι εφικτή η εναπόθεση κατά την εκτύπωση, τα υλικά που είναι σε στερεά κατάσταση σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, πρέπει να θερμανθούν ώστε να ρευστοποιηθούν. Όσο αναφορά τα ρευστά που έχουν υψηλή συνεκτικότητα, η συνεκτικότητα τους θα πρέπει να μειωθεί για να είναι σε θέση να εκτυπωθούν.

Οι πιο συνηθισμένες πρακτικές είναι είτε να θερμανθεί το υλικό είτε να αναμιχθεί με διαλύτες ή κάποιο άλλο χαμηλής συνεκτικότητας συστατικό. Επιπλέον, ένα σημαντικό χαρακτηριστικό είναι η επιφανειακή τάση του ρευστού κατάλληλη από 20 – 40 mN/m για σωστή διαμόρφωση και πρόσφυση σταγονιδίων. Συγκεκριμένα η επιφανειακή τάση πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη, με στόχο να αποτρέπεται το ανεπιθύμητο στάξιμο από το ακροφύσιο, αλλά αρκετά μικρή ώστε να επιτρέπεται η αποκοπή από το ακροφύσιο.[26]

Ανάλογα την σύνθεση και την εφαρμογή τους τα υλικά που χρησιμοποιούνται στην τεχνολογία MJ είναι:

- Photopolymers (φωτοπολυμερή - ρητίνες)
- Ceramic inks (κεραμικά μελάνια)
- Metal inks (μεταλλικά μελάνια)
- Functional inks (ειδικά λειτουργικά μελάνια)
- Bioinks (βιοσυμβατά μελάνια)
- Composites inks (σύνθετα μελάνια)

Να σημειωθεί ότι υπάρχουν περιορισμοί στις ιδιότητες των μετάλλων και τον κεραμικών μελανιών, και είναι κυρίως σε ερευνητικό επίπεδο (μελάνια με νανοσωματίδια). Για τα μεταλλικά μελάνια ή ακόμα και κεραμικά μελάνια, τα μικροσκοπικά νανομεταλλικά σωματίδια περιέχονται σε ένα υγρό που λειτουργεί ως διαλύτης μεταφοράς, και με τον συνδυασμό αναφέρονται ως μελάνι. Αποκτώντας έτσι αρκετή ρευστότητα ώστε να μπορεί να είναι χρηστικό και να εναποτίθεται από το ακροφύσιο μέσω μιας διαδικασία εκτύπωσης με jetting, παρόμοια με την εκτύπωση πολυμερών.

Κατά την εκτύπωση, σταγονίδια εκτοξεύονται ξεχωριστά, από την μία το μελάνι του μετάλλου και από την άλλη μια ιδιόκτητη διαλυτή στερεά διασπορά που αναφέρεται ως μελάνι υποστήριξης. Το μελάνι υποστήριξης εναποτίθεται ακριβώς γύρω από την περίμετρο της προβλεπόμενης τομής του μέρους, λειτουργώντας ως τοίχος συγκράτησης ώστε να αποτρέψει το μελάνι μετάλλου (metal-ink) να βγει από τα καθορισμένα όρια.

Καθώς τα σταγονίδια έρχονται σε επαφή με τον θερμαινόμενο δίσκο εκτύπωσης, το υγρό μεταφοράς αρχίζει να εξατμίζεται, αφήνοντας πίσω τα σωματίδια καλυμμένα με ένα λεπτό στρώμα συνδετικού παράγοντα. Ένας λαμπτήρας θερμότητας βοηθά στην εξάτμιση του κατατεθειμένου υγρού και στη στερεοποίηση του δεσμευτικού παράγοντα. Μόλις εξατμιστεί πλήρως, τα σωματίδια συνδέονται μεταξύ τους, με αποτέλεσμα ένα λεπτό στρώμα συγκεντρωμένων νανοσωματιδίων μετάλλου. [27]

1.4.5 Εναπόθεση συγκολλητικής ουσίας (Binder jetting)

Η εναπόθεση συγκολλητικής ουσίας εφευρέθηκε στο ινστιτούτο τεχνολογίας της Μασαχουσέτης (MIT) στις αρχές του 1990. Η μέθοδος αυτή αναπτύχθηκε ως ‘ διεργασία 3d εκτύπωσης’, κατά την οποία εκτυπώνεται συγκολλητική ουσία πάνω σε μια κλίνη πούδρας, ώστε να σχηματιστούν οι διατομές ενός αντικειμένου. Σαν ιδέα μπορεί να συγκριθεί με τη σύντηξη πούδρας σε κλίνη, όπου οι διατομές του αντικειμένου σχηματίζονται με την βοήθεια ενός λέιζερ, το οποίο λιώνει τοπικά σωματίδια πούδρας.

Στην τεχνολογία Binder jetting ελάχιστο μέρος του υλικού κατασκευής του αντικειμένου προσδίδεται διαμέσου της κεφαλής εκτύπωσης ενώ το μεγαλύτερο μέρος είναι στην πούδρα της κλίνης. Κατά κανόνα, σταγονίδια συγκολλητικής ουσίας τα οποία έχουν διάμετρο 80μm σχηματίζουν σφαιρικά συσσωματώματα της υγρής συγκολλητικής ουσίας με τα σωματίδια πούδρας, προκαλώντας επίσης την απαραίτητη σύνδεση με τη στρώση που έχει είδη εκτυπωθεί προηγουμένως.

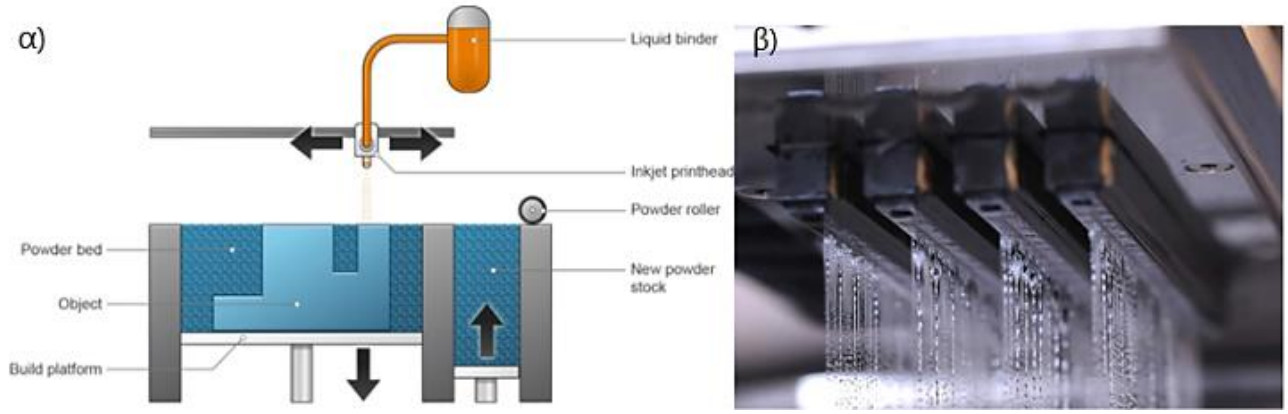
Μόλις γίνει η εκτύπωση μίας στρώσης, η κλίνη πούδρας υποβιβάζεται ενώ παράλληλα διαστρώνεται επάνω της ένα νέο στρώμα πούδρας μέσο ενός αντίστροφα περιστρεφόμενου κυλινδρικού μηχανισμού. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να ολοκληρωθεί η κατασκευή του αντικειμένου. Επιπλέον, λόγω του ότι οι κεφαλές του εκτυπωτή διαθέτουν πολλά ακροφύσια για την παροχή υλικού, η διεργασία χρησιμοποιεί πολλά παράλληλα μονοδιάστατα στοιχεία για τον σχηματισμό διάφορων μοτίβων.

Μετά το τέλος της εκτύπωσης, το τελικό αντικείμενο παραμένει μέσα στην κλίνη της πούδρας, προκειμένου να στερεοποιηθεί η συγκολλητική ουσία και το αντικείμενο να αποκτήσει την απαραίτητη αντοχή. Η μετ' επεξεργασία του κομματιού περιλαμβάνει την αφαίρεση του από τη κλίνη της πούδρας, τον καθαρισμό υπολειμμάτων ασύνδετης πούδρας με αέρα και την επεξεργασία του με διηθητικό παράγοντα, με στόχο την βελτίωση αντοχής και τη απόκτηση καλύτερων μηχανικών ιδιοτήτων. [28]

Γενικότερα αυτή η μέθοδος παρουσιάζει πλεονεκτήματα παρόμοια με τις διεργασίες πούδρας σε κλίνη. Τα κομμάτια μου κατασκευάζονται στηρίζονται από την πούδρα εντός τις κλίνης και δεν χρειάζονται υποστηρίξεις. Επιπλέον, πολλά αντικείμενα μπορούν να τοποθετηθούν το ένα δίπλα στο άλλο ή και πάνω εντός της κλίνης παρέχοντας το πλεονέκτημα να κατασκευαστούν πολλά αντικείμενα κατά την διάρκεια μίας εκτύπωσης.

Οι εφαρμογές της μεθόδου binder jetting εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από το υλικό (πούδρα) που χρησιμοποιείται. Για παράδειγμα, υπάρχουν στο εμπόριο εκτυπωτές χαμηλού κόστους που χρησιμοποιούν πούδρα με βάση τον γύψο και συγκολλητική ουσία με βάση το νερό, και σε συνδυασμό με έγχρωμες κεφαλές (χρωστικές ουσίες) είναι δυνατόν να εκτυπωθούν υψηλής αισθητικής αντικείμενα. Στο σχήμα 1.4.5.1 φαίνονται τα βασικά μέρη του εκτυπωτή καθώς και τα ακροφύσια εναπόθεσης συγκολλητικής ουσίας.

Ακόμα μπορούν να παραχθούν αντικείμενα με πούδρα μετάλλων, τα οποία χρησιμοποιούνται ως λειτουργικά πρωτότυπα ή αποτελούν τελικά προϊόντα παραγωγής. Μερικές μηχανές έχουν την δυνατότητα να χρησιμοποιούν ως πούδρα πυρίτιο ή άμμο χυτηρίου, κατασκευάζοντας καλούπια για χύτευση. Αυτή η δυνατότητα των εκτυπωτών binder jetting τους καθιστά πολύ σημαντικούς σε εφαρμογές στον κλάδο της αυτοκινητοβιομηχανίας και της κατασκευής βαρέων μηχανημάτων. [29]



Σχήμα 1.4.5.1 *α)binder jetting technology και β)εναπόθεση συγκολλητικής ουσίας. [30]*

Υλικά

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στην μέθοδο binder jetting χωρίζονται σε διάφορες κατηγορίες, όπως μέταλλα, κεραμικά, πολυμερή, άμμο και σύνθετα υλικά. Κάθε κατηγορία προσφέρει μοναδικά χαρακτηριστικά τα οποία βρίσκουν χρήση σε πολλούς κλάδους.

Περιορισμένη εργασία έχει γίνει γύρω από τα πολυμερή και αυτό συμβαίνει γιατί σπάνια κατασκευάζονται από σκόνη. Ωστόσο στα πρώτα στάδια χρησιμοποιήθηκαν πολυμερή για συσκευές χορήγησης φαρμάκων και την κατασκευή σκαφών. Πολυμερή όπως πολυγλικολικό οξύ (PGA), το πολυγαλακτικό οξύ (PLA), η πολυκαπρολακτόνη (PCL) και το οξείδιο του πολυαιθυλένιού (PEO) έχουν εκτυπωθεί.

Το μεγαλύτερο ποσοστό της βιομηχανικής παραγωγής με την χρήση BJ αφορά μεταλλικά εξαρτήματα, και ένα σημαντικό μέρος επικεντρώνετε σε παραδοσιακά κράματα μεταλλουργίας σε μορφή σκόνης, όπως είναι ο ανοξείδωτος χάλυβας. Εξίσου μεγάλη εφαρμογή έχουν τα κεραμικά υλικά καθώς έχει πραγματοποιηθεί μεγάλη ερευνά για την εφαρμογή τους. Έρευνα για την αλουμίνα έχει δείξει ότι με κατάλληλες παραμέτρους μπορούν να πετύχουν πυκνότητα μετά την πυροσυσσωμάτωση περίπου 96% της πραγματικής πυκνότητας και περίπου 10% συρρίκνωση στην κάθετη διεύθυνση. [29]

Παρακάτω ακολουθεί ο πίνακας 1.4.5.1 με τα πιο συνήθη υλικά που χρησιμοποιούνται στην τεχνολογία αυτή:

Υλικά	**Ιδιότητες**	**Εφαρμογές**
Μέταλλα		

Ανοξείδωτος χάλυβας	• Υψηλή αντοχή • Αντοχή στη διάβρωση	Λειτουργικά εξαρτήματα, αυτοκινητοβιομηχανία
Τιτάνιο	• Ελαφρύ • Υψηλή αντοχή • Βιοσυμβατό	Ιατρικά εμφυτεύματα, εξαρτήματα, αεροδιαστημική
Κράμα Inconel	• Αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες • Αντοχή στην διάβρωση	Αεροδιαστημική, ενεργειακή βιομηχανία
Μπρούτζος	• Υψηλή αντοχή • Καλή ποιότητα εκτύπωσης	Κοσμήματα, διακοσμητικά αντικείμενα
Χαλκός	• Υψηλή θερμική αντοχή • Υψηλή θερμική αγωγιμότητα	Εναλλάκτες θερμότητας, ηλεκτρικά εξαρτήματα
Σίδερο	• Υψηλή αντοχή • Ανθεκτικό σε φθορά • Καλές μηχανικές ιδιότητες	Αυτοκινητοβιομηχανία, κατασκευή εξαρτημάτων αυτοκινήτου-εργαλειομηχανών
Κεραμικά		
Αλουμίνα (AI_2O_3)	• Θερμική αντοχή • Ηλεκτρική μόνωση	Ηλεκτρονικά, εξαρτήματα αντοχής σε φθορά
Καρβίδιο πυριτίου	• Ανθεκτικό στην φθορά • Υψηλή σκληρότητα • Θερμική αγωγιμότητα	Βιομηχανικά εξαρτήματα υψηλής απόδοσης
Ζιρκονία (ZrO_2)	• Υψηλή αντοχή • Χημική αντίσταση • Θερμική μόνωση	Οδοντικά εμφυτεύματα, θερμικά εμπόδια
Πολυμερή		
PMMA	• Διαφανές • Υψηλή λεπτομέρεια κατά την εκτύπωση	Οπτικά μοντέλα, πρωτότυπα
Άμμος		
Χαλαζιακή άμμος	• Υλικό γενικής χρήσης για χύτευση	Καλούπια και πυρήνες χύτευσης
Ολιβινική άμμος	• Υψηλή θερμική αντίσταση	Εφαρμογές χύτευσης υψηλών θερμοκρασιών
Χρωμιτική άμμος (chromite sand)	• Υψηλή θερμική αντίσταση • Αντοχή σε θερμικά σοκ	Πολύπλοκες διαδικασίες χύτευσης
Σύνθετα υλικά		
Μέταλλο-πολυμερικά μείγματα	• Συνδυασμός αντοχή και ευκαμψίας	Εργαλεία, πρωτότυπα

Πίνακας 1.3.5.1 *Υλικά-ιδιότητες-εφαρμογές τεχνολογίας binder jetting. [31],[32],[14]*

Μετά την εκτύπωση πρέπει να εφαρμοστούν κάποιες διεργασίες με στόχο την βελτίωση των ιδιοτήτων των εκτυπωμένων αντικειμένων. Οι διεργασίες είναι οι εξής:

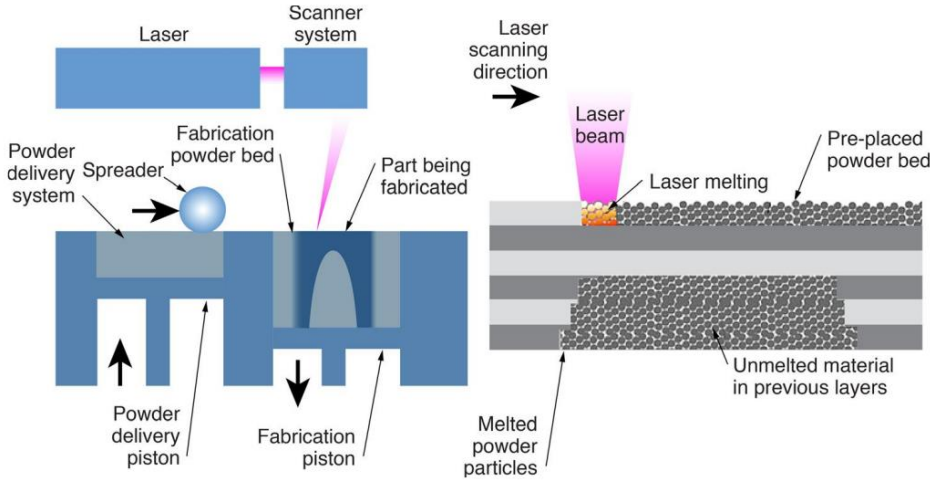
- **Σύντηξη**: είναι η διαδικασία θέρμανσης του εκτυπωμένου αντικειμένου κοντά στο σημείο τήξης με σκοπό την μείωση της πορώδους δομής ενισχύοντας την αντοχή και τις μηχανικές ιδιότητες. Χρησιμοποιείται κυρίως σε υλικά όπως μέταλλα (ανοξείδωτος χάλυβας, τιτάνιο) και κάποια κεραμικά.
- **Διείσδυση**: είναι η διαδικασία πλήρωσης των πορώδων κενών του τελικού αντικειμένου με ένα άλλο υλικό μέταλλο ή ρητίνη με σκοπό την αύξηση αντοχής και ακαμψίας. Χρησιμοποιούνται υλικά όπως μπρούτζος ή ειδικές ρητίνες για σύνθετα ή κεραμικά υλικά.
- **Σκλήρυνση**: είναι η διαδικασία που περιλαμβάνει την έκθεση του εκτυπωμένου αντικειμένου σε θερμότητα UV φως ή χημική αντίδραση με σκοπό την σκλήρυνση του συνδετικού υλικού που συγκρατεί την σκόνη. Χρησιμοποιείται σε πολυμερή όπως το PMMA και σε άμμο.

1.4.6 Σύντηξη πούδρας σε κλίνη (Powder Bed Fusion – PBF)

Η σύντηξη πούδρας σε κλίνη είναι μεταξύ των πρώτων διεργασιών προσθετικής κατασκευής. Όλες η διεργασίες της PBF έχουν κοινά χαρακτηριστικά τα οποία περιλαμβάνουν μία ή περισσότερες πηγές θερμότητας, που προκαλούν τη σύντηξη των σωματιδίων της πούδρας. Η πρώτη τεχνολογία που παρουσιάστηκε στο εμπόριο είναι η επίλεκτη πυροσυσσωμάτωση με λέιζερ (SLS) (σχήμα 1.4.6.1) που αναπτύχθηκε στο University of Texas στο Austin, USA.

Στην αγορά σήμερα υπάρχουν διάφορες τεχνολογίες στην κατηγορία Powder bed fusion, που διαφέρουν στο τρόπο που προκαλούν σύντηξη των υλικών (πυροσυσσωμάτωση – τήξη) καθώς και τα υλικά που χρησιμοποιούν. Οι βασικές μέθοδοι είναι:

- Επίλεκτη πυροσυσσωμάτωση με λέιζερ (Selective Laser Sintering-SLS)
- Επίλεκτη τήξη με λέιζερ (Selective Laser Melting-SLM)
- Τήξη με δέσμη ηλεκτρονίων (Electron Beam Melting- EBM)
- Πολυτζετική σύντηξη (Multi-jet Fution- MJF)
- Άμεση συγκολλητική σύντηξη μετάλλων με λέιζερ (Direct Metal Laser Sintering -DMLS)



Σχήμα 1.4.6.1 *SLS technology. [33]*

Η τεχνολογία SLS (Selective Laser Sintering) ή Επιλεκτική Πυροσυσσωμάτωση με Λέιζερ, χρησιμοποιεί ως υλικό εκτύπωσης σκόνη πολυμερών, η οποία στερεοποιείται μέσω της θερμικής ενέργειας που παρέχει ένα λέιζερ. Η διαδικασία εκτύπωσης βασίζεται στην κατασκευή αντικειμένων σε στρώσεις, ακολουθώντας τη μέθοδο **Bottom-up**.

Η διαδικασία ξεκινά με την τοποθέτηση της σκόνης σε μια θερμαινόμενη πλατφόρμα εκτύπωσης, η οποία διατηρείται σε θερμοκρασία λίγο κάτω από το σημείο τήξης του υλικού. Το λέιζερ υψηλής ενέργειας διαγράφει το σχέδιο της πρώτης στρώσης, λιώνει τους κόκκους της σκόνης και προκαλεί συσσωμάτωση. Στη συνέχεια, η πλατφόρμα κατεβαίνει κατά το πάχος της στρώσης, και ένας μηχανισμός προσθέτει μια νέα στρώση σκόνης, η οποία απλώνεται ομοιόμορφα μέσω του **Powder Roller**. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι να ολοκληρωθεί η κατασκευή του αντικειμένου.

Μόλις ολοκληρωθεί η εκτύπωση, το τελικό αντικείμενο παραμένει "θαμμένο" στη σκόνη. Ένας θόλος τοποθετείται πάνω από την πλατφόρμα εκτύπωσης για να συγκρατήσει τη σκόνη κατά τη μεταφορά. Το αντικείμενο στη συνέχεια καθαρίζεται με πεπιεσμένο αέρα ή πινέλα. Αξίζει να σημειωθεί ότι η περισσευούμενη σκόνη είναι ανακυκλώσιμη και επαναχρησιμοποιείται σε μελλοντικές εκτυπώσεις, μειώνοντας το κόστος των αναλωσίμων.

Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα των τεχνολογιών Powder bed fusion είναι η απουσία ανάγκης για υποστηρικτικό υλικό, καθώς η μη χρησιμοποιούμενη σκόνη δρα ως φυσικό υποστηρικτικό στοιχείο για το αντικείμενο. Αυτό διευκολύνει τη δημιουργία προϊόντων με πολύπλοκες γεωμετρίες, λεπτές δομές και υψηλή ακρίβεια. Τα τελικά αντικείμενα είναι συμπαγή, με εξαιρετική επιφάνεια και υψηλή αντοχή. [34]

Υλικά

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στην μέθοδο PBF ποικίλουν ανάλογα με τις εφαρμογές και τις απαιτήσεις. Οι βασικές κατηγορίες είναι μέταλλα, κεραμικά και πολυμερή με το κάθε ένα ξεχωριστά να παρουσιάζει μοναδικές ιδιότητες και χαρακτηριστικά για διαφορετικές εφαρμογές.

Κάθε τεχνολογία της μεθόδου αυτής, παρουσιάζει ιδιαιτερότητες στα υλικά που μπορεί να επεξεργαστεί και να χρησιμοποιήσει. Αυτό προκύπτει από τις τεχνολογικές διαφορές στην λειτουργεία (π.χ. πηγή ενέργειας και θερμική διαχείριση) καθώς και στις απαιτήσεις των υλικών. Συνεπώς, ένα παράδειγμα είναι η διαφορά στην επεξεργασία υλικών στην τεχνολογία SLA και SLM αφού η πρώτη δεν επαρκεί για πλήρη τήξη μετάλλων με αποτέλεσμα να μην μπορεί να επεξεργαστεί μέταλλά (τιτάνιο, αλουμίνιο) όπως η τεχνολογία SLM. Παρακάτω ακολουθούν πίνακες 1.4.6.1 και 1.4.6.2 υλικών των τεχνολογιών SLS και SLM:

Υλικά	**Ιδιότητες**	**Εφαρμογές**
Πολυμερή		
Nylon 6 Nylon 12 Nylon 11	• Υψηλή αντοχή • Υψηλή χημική αντοχή • Εξαιρετική αντοχή σε φθορά και θερμοκρασία	Εξαρτήματα αυτοκινήτων, βιομηχανικά εξαρτήματα, ιατρικές συσκευές όπως προσθετικά και ελαφριές κατασκευές
TPU – TPE	• Υψηλή ελαστικότητα • Υψηλή ευκαμψία • Αντοχή σε φθορά • Απορρόφηση κρούσεων	Στεγανοποιήσεις, φλάντζες υποδήματα, εύκαμπτα πρωτότυπα
PP (πολυπροπυλένιο)	• Ελαφρύ • Καλή αντοχή σε μηχανικές καταπονήσεις • Υψηλή χημική αντοχή	Καταναλωτικά προϊόντα, εξαρτήματα αυτοκινήτων και συσκευασίες
PEEK (πολυαιθεραιθεροκετόνη) PPS (πολυφαινυλενισουλφίδιο)	• Υψηλή αντοχή σε θερμότητα • Εξαιρετική χημική αντοχή • Βιοσυμβατό (PEEK)	Αεροδιαστημική, ιατρικά εμφυτεύματα, ηλεκτρονικά
Σύνθετα υλικά		
Νάιλον ενισχυμένο με ίνες γυαλιού ή άνθρακα	• Εξαιρετική αντοχή • Υψηλή ακαμψία • Υψηλή θερμική και χημική αντοχή	Εξαρτήματα αυτοκινήτων και αεροδιαστημικής βιομηχανίας, γενικότερα εφαρμογές που απαιτούν υψηλή ανθεκτικότητα
Νάιλον ενισχυμένο με κεραμικά σωματίδια(Αλουμίνα ή διοξείδιο του πυριτίου)	• Εξαιρετική θερμική αντοχή • Υψηλή αντοχή στην φθορά	Εξαρτήματα κατάλληλα για αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες και φθορές
Κεραμικά		
Αλουμίνα (AI_2O_3)	• Υψηλή σκληρότητα και αντοχή σε φθορά • Εξαιρετική θερμική σταθερότητα • Πολύ καλή ηλεκτρική μόνωση	Εξαρτήματα για φούρνους, ηλεκτρική μονωτές, ανθεκτικά εξαρτήματα σε φθορά
Ζιρκονία (ZrO_2)	• Υψηλή αντοχή στη θραύση • Καλή θερμική σταθερότητα	Λάμες κοπής, θερμικά εμπόδια κατάλληλο για εφαρμογές υψηλής φθοράς

Πίνακας 1.4.6.1 *Υλικά-Ιδιότητες-Εφαρμογές τεχνολογίας SLS. [35],[36]*

Υλικά	**Ιδιότητες**	**Εφαρμογές**
Μέταλλα		
Κράματα αλουμινίου (AISi10Mg)	• Ελαφρύ • Υψηλή αντοχή • Καλή θερμική αγωγιμότητα • Ανθεκτικό σε διάβρωση	Αεροναυπηγική, αυτοκινητοβιομηχανία, εξαρτήματα αγώνων και εργαλεία
Τιτάνιο (Ti)	• Υψηλή μηχανική αντοχή • Ανθεκτικό σε διάβρωση	Ορθοπεδικά εμφυτεύματα, αεροδιαστημική, εξαρτήματα κινητήρων

	• Βιοσυμβατό	
Κράματα χαλκού	• Εξαιρετική θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα	Ψήκτρες, ηλεκτρικά εξαρτήματα

Πίνακας 1.4.6.2 *Υλικά-Ιδιότητες-Εφαρμογές τεχνολογίας SLM. [14]*

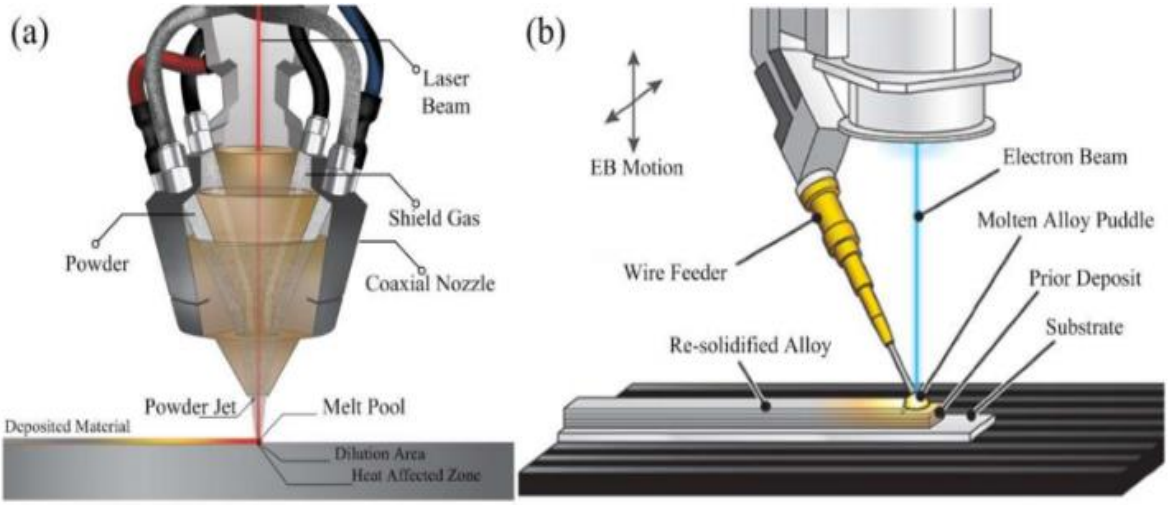
1.4.7 Εναπόθεση με κατευθυνόμενη ενέργεια (Direct Energy Deposition -DED)

Με την τεχνολογία εναπόθεσης με κατευθυνόμενη ενέργεια, είναι δυνατή η δημιουργία αντικειμένων με τήξη του υλικού καθώς αυτό εναποτίθεται. Παρόλο που μπορεί να εφαρμοστεί σε υλικά όπως πολυμερή, σύνθετα μεταλλικής μήτρας, και κεραμικά χρησιμοποιείται κυρίως σε μεταλλικές πούδρες και γι' αυτό μπορεί να ονομαστεί και εναπόθεση μετάλλου (metal deposition).

Στις διεργασίες DED, η ενέργεια συσσωρεύεται στοχευμένα σε μια περιοχή, με στόχο να θερμανθεί το υπόστρωμα το οποίο τήκεται διαμορφώνοντας μια περιοχή ταγμένου υλικού μέσα στην οποία εναποτίθεται και τήκεται ταυτόχρονα το βασικό υλικό. Για παράδειγμα σε αντίθεση με την τεχνολογία σύντηξης πούδρας σε κλίνη, οι διεργασίες της DED δεν χρησιμοποιούνται για την τήξη ενός υλικού το οποίο είναι ήδη στρωμένο σε κλίνη πούδρας, αλλά για την τήξη υλικού ενώ αυτά εναποτίθενται μέσο ενός ακροφυσίου.

Για την δημιουργία τρισδιάστατων αντικειμένων η διεργασία της DED το επιτυγχάνει με την εστιασμένη πηγή θερμότητας (συνήθως λέιζερ ή δέσμη ηλεκτρονίων) ώστε να τήξουν το τροφοδοτούμενο υλικό όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.4.7.1. Ο τρόπος είναι παρόμοιος με αυτόν των διεργασιών της εξώθησης υλικού, αφού σε κάθε πέρασμα της κεφαλής δημιουργεί ένα ίχνος στερεοποιημένου υλικού, το οποίο σε συνδυασμό με την προηγούμενη στρώση δημιουργεί το αντικείμενο. Επιπλέον σε πολύπλοκες γεωμετρίες απαιτούνται στηρίγματα ή περισσότερες κεφαλές εναπόθεσης. [37]

Μια από τις πιο αποτελεσματικές χρήσεις της τεχνολογίας DED είναι η αποκατάσταση μεταλλικών εξαρτημάτων προσθέτοντας υλικό σε φθαρμένα μέρη, όπως λεπίδες των τουρμπίνων. Εκτός από τις εφαρμογές επισκευής, η τεχνολογία αυτή έχει ήδη βρει εφαρμογή σε πολλούς τομείς της αεροναυπηγικής και της άμυνας. Για παράδειγμα, χρησιμοποιείται σε δεξαμενές καυσίμου από τιτάνιο σε δορυφόρους και σε δομικά μέρη από τιτάνιο σε αεροσκάφη Boeing 787. [38]



Σχήμα 1.4.7.1 *DED technology a)Powder DED (laser source) b) Wire DED (E-Beam source). [38]*

Υλικά

Η κατηγορίες των υλικών που χρησιμοποιούνται στην τεχνολογία DED περιλαμβάνουν μεταλλικά κράματα, σύνθετα υλικά και υλικά τα οποία έχουν υψηλή απόδοση. Σαν τεχνολογία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτύπωση σχεδόν οποιουδήποτε μεταλλικού υλικού που μπορεί να γίνει συγκόλληση, όπως είναι το τιτάνιο και τα κράματα του, το ανοξείδωτο ατσάλι, το αλουμίνιο κ.α. Επιπλέον οι μοναδικές ιδιότητες κεραμικών υλικών όπως ζιρκονία ή αλουμίνιο καθιστούν αναπόσπαστα για εξειδικευμένες βιομηχανίες. Η εμφάνιση σύνθετων υλικών σηματοδοτεί επίσης μια σημαντική αλλαγή, προσφέροντας βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες μέσω της ενσωμάτωσης κεραμικών σωματιδίων ή ινών μέσα σε μεταλλικές ή κεραμικές μήτρες. Παρακάτω ακολουθεί ο πίνακας 1.4.7.1 με τα υλικά που χρησιμοποιούνται στην τεχνολογία DED.

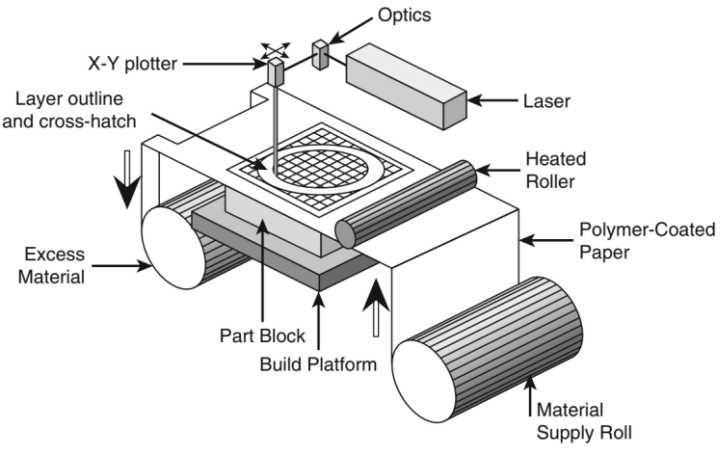
Υλικά	Ιδιότητες	Εφαρμογές
Τιτάνιο	• Αντοχή σε διάβρωση • Βιοσυμβατό • αντοχή σε θερμότητα • χαμηλή πυκνότητα	Αεροδιαστημική, αυτοκινητοβιομηχανία, ιατρικά εμφυτεύματα
Αλουμίνιο	• ελαφρύ • καλή ηλεκτρική αγωγιμότητα • χαμηλή πυκνότητα • εύκολη επεξεργασία	Αεροδιαστημική, αυτοκινητοβιομηχανία, ανταλλακτικά
Ανοξείδωτο ατσάλι	• υψηλή θερμική αντοχή • αντοχή σε διάβρωση • υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό	Επισκευή κινητήρων, εφαρμογές στην αεροδιαστημική
Κράματα νικελίου (Inconel), κεραμικά	• εξαιρετική αντοχή σε θερμοκρασία • αντοχή σε διάβρωση • εξαιρετική αντοχή σε μηχανικές τάσεις	Εξοπλισμό χημικής επεξεργασίας και εφαρμογές υψηλής θερμοκρασίας, μέρη κινητήρων, εξαρτήματα αεροδιαστημικής

Πίνακας 1.4.7.1 *Υλικά-Ιδιότητες-Εφαρμογές τεχνολογίας DED. [14]*

1.4.8 Συγκόλληση φύλλων (Sheet Lamination)

Είναι μια από τις πρώτες εμπορικά διαθέσιμες τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής με όνομα (Laminated Object Manufacturing – LOM). Συγκεκριμένα η τεχνολογία αυτή αποτελεί μια μέθοδο που το αντικείμενο δημιουργείται μέσω διαδοχικών στρώσεων υλικού. Κάθε στρώση αποτελείται από φύλα υλικού, τα οποία κόβονται με ακρίβεια με την χρήση λέιζερ CO_2, σύμφωνα με το τρισδιάστατο περίγραμμα του μοντέλου CAD. Στην συνέχεια τα φύλα συγκολλούνται μεταξύ τους, με την εφαρμογή πίεσης και θερμότητας, χρησιμοποιώντας έναν θερμαινόμενο κύλινδρο (Heater roller) όπως φαίνεται αναλυτικά στο σχήμα 1.4.8.1.

Η συγκεκριμένη τεχνολογία υποστηρίζει μια ευρεία ποικιλία υλικών, όπως κεραμικά, μέταλλα πολυμερή και χαρτί, γεγονός που επιτρέπει τη χρήση της σε πολλαπλές εφαρμογές. Παρ' όλα αυτά, ένα σημαντικό μειονέκτημά της είναι η δυσκολία στην απομάκρυνση των υποστηρικτικών δομών, καθώς και η αδυναμία ανακύκλωσης του υλικού που χρησιμοποιείται για στήριξη. [39]



Σχήμα 1.4.8.1 *LOM technology. [40]*

Υλικά

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται σε αυτή την μέθοδο διαφέρουν αρκετά ανάλογα τις απαιτήσεις τις εφαρμογής. Τα πιο κοινά περιλαμβάνουν φύλλα χαρτιού καθώς είναι οικονομικά και ιδανικά για πρωτότυπα και αισθητικές εφαρμογές, πολυμερή υλικά, όπως θερμοπλαστικά και πολυκαρβονικά φύλλα τα οποία προσφέρουν ανθεκτικότητα, και σύνθετα υλικά που εξασφαλίζουν υψηλή αντοχή με χρήση σε εξειδικευμένες εφαρμογές.

Παράλληλα, χρησιμοποιούνται μεταλλικά φύλλα για εφαρμογές που απαιτούν θερμική και δομική αντοχή, αλλά και κεραμικά υλικά για υψηλή χημική και θερμική αντίσταση. Στον παρακάτω πίνακα 1.4.8.1 δίνονται πληροφορίες για τα υλικά που χρησιμοποιούνται στην τεχνολογία LOM.

Υλικά	**Ιδιότητες**	**Εφαρμογές**
[Πολυμερικά φύλλα] Θερμοπλαστικά (ABS,PLA) Πολυκαρβονικό (PC)	• Ελαφριά • Ανθεκτικά • Καλή θερμική αγωγιμότητα • Συγκόλληση με κόλλα	Λειτουργικά πρωτότυπα, βιομηχανία χαρτιού
Χαρτί	• Οικονομικό • Κάλος αγωγός ηλεκτρισμού	Βιομηχανία ηλεκτρονικών, πρωτότυπα για οπτικές δοκιμές, καλλιτεχνικά και αρχιτεκτονικά μοντέλα
Σύνθετα	• Βελτιωμένη ανθεκτικότητα και ακαμψία • Χαμηλή πυκνότητα	Δομικά μοντέλα που απαιτούν πρόσθετη αντοχή, εξαρτήματα αυτοκινητοβιομηχανίας και αεροδιαστημικής
Κεραμικά	• Υψηλή αντοχή στη θερμότητα • Χημική σταθερότητα • Υψηλή αντοχή και σκληρότητα	Καλούπια υψηλής θερμοκρασίας, εξαρτήματα για ηλεκτρονικές συσκευές
Μέταλλα	• Υψηλή δομική ακεραιότητα • Εξαιρετικές θερμικές και ηλεκτρικές ιδιότητες	Λειτουργικά μεταλλικά μέρη στην αεροδιαστημική, εργαλεία και εξαρτήματα στήριξης

Πίνακας 1.4.8.1 *Υλικά-Ιδιότητες-Εφαρμογές τεχνολογίας LOM. [14]*

Κεφάλαιο 2 : Αυξητικά Υλικά

2.1 Εισαγωγή στα Αυξητικά Υλικά

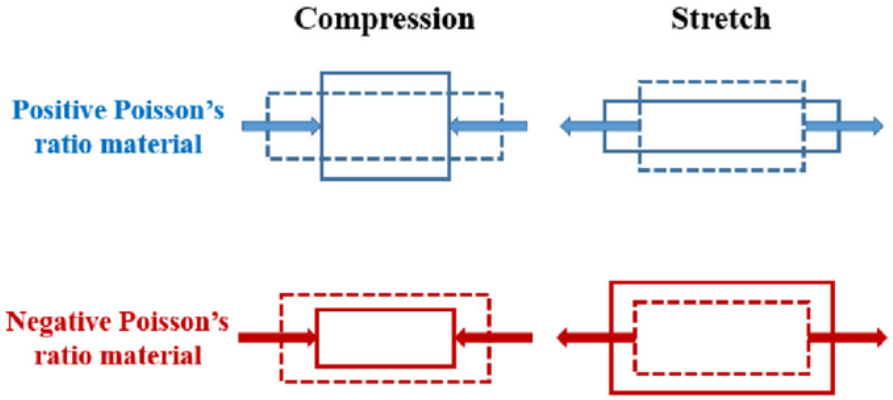
Τα αυξητικά υλικά (Aauxetic materials) είναι μοναδικά λόγω της αρνητικής αναλογίας Poisson (Negative Poisson's Ratio – NPR) που παρουσιάζουν. Αυτό σημαίνει ότι, σε αντίθεση με τα συμβατικά υλικά, διαστέλλονται πλευρικά όταν τεντώνονται και συστέλλονται όταν συμπιέζονται όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1. Αυτό συμβαίνει λόγω ειδικών εσωτερικών δομών, που προσδίδουν εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες όπως αυξημένη απορρόφηση ενέργειας, υψηλή αντοχή σε θραύση και βελτιωμένη ανθεκτικότητα. [41]

Ο λόγος του Poisson (V) ενός υλικού, είναι ο λόγος της εγκάρσιας συστολής προς τη διαμήκη τάση για ένα υλικό που υφίσταται εφελκυσμό στην διαμήκη διεύθυνση, δηλαδή δείχνει πόσο λεπταίνει το υλικό όταν τεντώνεται. Η αυξητική συμπεριφορά αναφέρθηκε από την αρχή της δεκαετίας του 1920, ωστόσο το 1987 παρατηρήθηκε μια σημαντική έρευνα από τον R.S. Lakes [42], ο οποίος απέδειξε ότι αφρώδη υλικά μπορούσαν να εμφανίζουν αρνητικό λόγο Poisson. Ωστόσο από την φύση υπάρχουν είδη δομές με αυξητικές ιδιότητες όπως τένοντες, δέρμα (ιστοί) που προσφέρουν ευκαμψία και ανθεκτικότητα.

Ο λόγος Poisson (ν), ορίζεται ως :

$$V = -\frac{\varepsilon_{trans}}{\varepsilon_{load}} \tag{2.1.1}$$

Όπου ε_{load} είναι η παραμόρφωση στη διεύθυνση της φόρτισης, ενώ ε_{trans} είναι η παραμόρφωση που είναι κάθετη ή εγκάρσια στη διεύθυνση της φόρτισης. Δεδομένου ότι είναι τόσο συνηθισμένο το ε_{load} και το ε_{trans} να έχουν αντίθετα πρόσημα, δηλαδή ο λόγος τους να είναι αρνητικός, εισήχθη ένα αρνητικό πρόσημό στην εξίσωση ώστε να προκύπτουν θετικές τιμές για τους λόγους Poisson.



Σχήμα 2.1.1 *Συμπεριφορά σε εφελκυσμό και θλίψη ενός αυξητικού και μη αυξητικού υλικού. [43]*

Η αρχική επιτυχία των αυξητικών υλικών έχει κινητοποιήσει τους ερευνητές να σχεδιάσουν και να κατασκευάσουν πιο άκαμπτες δομές για διάφορες εφαρμογές μηχανικής. Αυτό συμβαίνει καθώς οι εγγενείς αντιδράσεις τον φυσικά εμφανιζόμενων αυξητικών υλικών είναι ανεπαρκείς για την άμεση ενσωμάτωσή τους σε μηχανικές δομές, επομένως οι αυξητικές δομές που προκαλούν βελτιωμένες αντιδράσεις είναι σε μεγάλο βαθμό απαραίτητες.

Έχουν πραγματοποιηθεί μελέτες για την ανάπτυξη διαφορετικών αυξητικών αρχιτεκτονικών δομών προκειμένου να ενισχυθεί το αυξητικό φαινόμενο, το οποίο με τη σειρά του μπορεί να βελτιώσει ιδιότητες όπως η απορρόφηση ενέργειας. Παρατηρείται ότι κάθε γεωμετρία προσφέρει διαφορετικά χαρακτηριστικά και επιπλέον πολλές μελέτες έχουν εξετάσει επίσης την δημιουργία μεθόδων για την βελτιστοποίηση αυτών των δομών, ώστε να βελτιωθούν οι ιδιότητες σε σχέση με την μάζα τους.

Επίσης, τα τελευταία χρόνια, ο τομέας των αυξητικών δομών έχει σημειώσει εντυπωσιακή πρόοδο λόγω της εξέλιξης στον υπολογιστικό σχεδιασμό, την προσθετική κατασκευή και την επιστήμη των υλικών. Συγκεκριμένα, η εξαιρετική ικανότητα απορρόφησης ενέργειας σε σχέση με τα συμβατικά υλικά, έχει ως αποτέλεσμα να μελετηθούν ευρέως για χρήση σε προστατευτικό εξοπλισμό, όπως κράνη, αλεξίσφαιρα γιλέκα,

επενδύσεις απορρόφησης κραδασμών καθώς και στον τομέα της αυτοκινητοβιομηχανίας ιδιαίτερα στον σχεδιασμό προφυλακτήρων και προστατευτικών κρούσεων για την ασφάλεια των επιβατών.

Οι παραδοσιακοί προφυλακτήρες βασίζονται σε υλικά που απορροφούν ενέργεια, όπως αφροί και κυψελωτές δομές, για να ελαχιστοποιήσουν τις φθορές κατά την διάρκεια μιας σύγκρουσης. Ωστόσο, τα αυξητικά υλικά προσφέρουν μια ανώτερη εναλλακτική λύση, καθώς η μοναδική συμπεριφορά τους επιτρέπει την απορρόφηση κρούσεων πιο αποτελεσματικά, κατανέμοντας την πίεση ομοιόμορφα και μειώνοντας την συγκέντρωση των φορτίων σε ένα σημείο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μειώνεται η φθορά τόσο στο όχημα όσο και στους επιβάτες κατά την διάρκεια χαμηλών και υψηλών φορτίων κρούσης. [44]

2.2 Συντελεστής Young Modulus

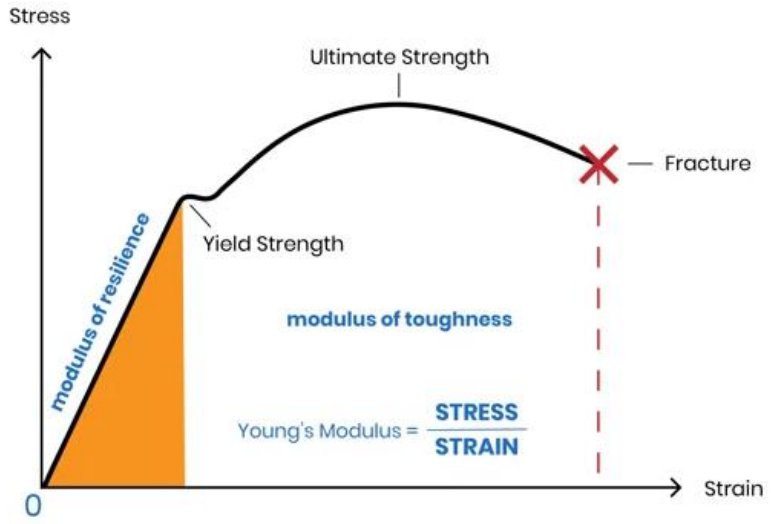
Ο συντελεστής του Young ή μέτρο ελαστικότητας του Young (Young's Modulus, E), είναι ο δείκτης που περιγράφει την ικανότητα του υλικού να αντιστέκεται σε ελαστική παραμόρφωση υπό την επίδραση τάσης ή συμπίεσης προς μια κατεύθυνση. Εκφράζει την γραμμική σχέση μεταξύ της τάσης (σ) και της αντίστοιχης παραμόρφωσης (ε) σε ένα υλικό εντός του ελαστικού του ορίου, σύμφωνα με την σχέση:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \tag{2.2.1}$$

Όπου :

- Ε είναι ο συντελεστής του Young (μονάδα μέτρησης Pascal)
- Σ είναι η τάση (δύναμη ανά μονάδα επιφάνειας)
- Ε είναι η παραμόρφωση (σχετική αλλαγή μήκους)

Στο σχήμα 2.1.1 παρουσιάζεται μια καμπύλη τάσης παραμόρφωσης, για την περιγραφή της μηχανικής συμπεριφοράς ενός υλικού. Η περιοχή αντοχής (Modulus of resilience) με πορτοκαλί χρώμα δείχνει την ενέργεια που μπορεί να απορροφήσει το υλικό στην ελαστική του περιοχή, πριν φτάσει στο όριο διαρροής (Yield Strength).



Σχήμα 2.2.1 *Διάγραμμα δύναμης-παραμόρφωσης. (Thread, 2019.)*

Ο συντελεστής Young καθορίζει πόσο άκαμπτο ή εύκαμπτο είναι ένα υλικό, δηλαδή υλικά με υψηλή τιμή Ε είναι πιο άκαμπτα ενώ υλικά με χαμηλή τιμή Ε είναι πιο εύκαμπτα. Η κατανόηση και ο υπολογισμός του συντελεστή Young είναι κρίσιμη στην μηχανική των υλικών, καθώς είναι αναγκαίο στον σχεδιασμό κατασκευών και στην πρόβλεψη της συμπεριφοράς των υλικών υπό φορτίο. Μαζί με άλλες μηχανικές ιδιότητες όπως ο συντελεστής Poisson, παρέχει μια ολοκληρωμένη εικόνα για την ελαστική συμπεριφορά των υλικών, διευκολύνοντας την επιλογή για συγκεκριμένες εφαρμογές. [46]

2.3 Αυξητικές Δομές και Προσθετική Κατασκευή

Η προσθετική κατασκευή (Additive Manufacturing - AM) έχει τη δυνατότητα να συμβάλει στην κατασκευή και ανάπτυξη αυξητικών δομών (auxetic structures) με βελτιωμένες ιδιότητες και πολύλειτουργικές δυνατότητες. Σε αντίθεση με τις συμβατικές διαδικασίες, όπως η πλέξη, η χύτευση, η σύντηξη και η νηματοποίηση, η ΑΜ προσφέρει σημαντική ευελιξία και προσαρμοστικότητα στην παραγωγή αυτών των σύνθετων υλικών. Επιπλέον, η προσθετική κατασκευή (ΑΜ) καθιστά εφικτές σύνθετες γεωμετρίες, προσφέροντας πολύ μεγαλύτερη ελευθερία στον σχεδιασμό τελικών σχημάτων που διαφορετικά δεν θα μπορούσαν να επιτευχθούν.

Η τεχνολογία προσθετικής κατασκευής είναι εμπορικά διαθέσιμη και επιτρέπει σχεδόν απεριόριστη τοπολογική πολυπλοκότητα, χωρίς περιορισμούς σχεδιασμού της παραδοσιακής κατασκευής, για παράδειγμα μπορεί να παράγει δομές αυθαίρετης γεωμετρίας με σαφώς καθορισμένο τρόπο, να μειώσει τον χρόνο από την ιδέα έως το τελικό προϊόν και να διευκολύνει τις τροποποιήσεις στον σχεδιασμό και τη διαδικασία. [47]

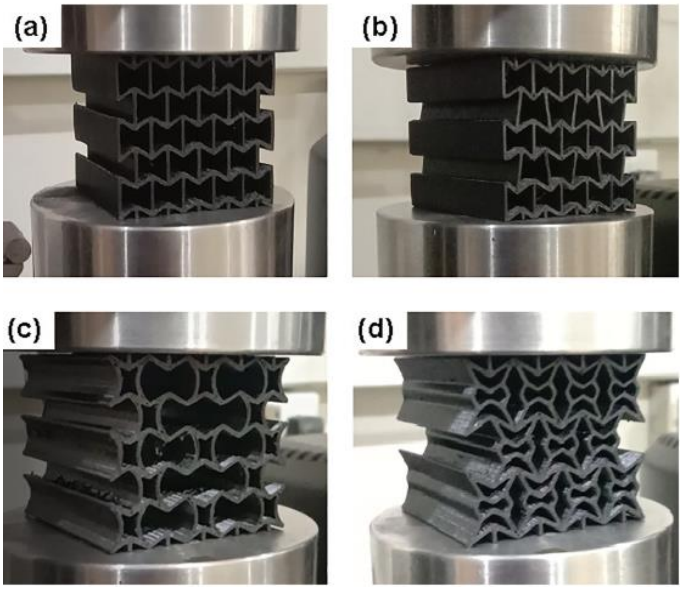
Συγκεκριμένα, η χρήση της τεχνολογίας FDM για την παραγωγή καινοτόμων auxetic δομών αποτελεί ένα σύγχρονο ερευνητικό πεδίο προσελκύοντας το ενδιαφέρον πολλών επιστημόνων, λόγω της δυνατότητας μελέτης, σχεδιασμού και κατασκευής δομών με βελτιωμένες ιδιότητες, ρυθμιζόμενες μηχανικές ιδιότητες και ικανότητα απορρόφησης κρουστικών φορτίων.

Για παράδειγμα, οι Grimmelsmann κ.α. [48] συνδύασαν την τρισδιάστατη εκτύπωση με την πλεκτή τεχνολογία για την ανάπτυξη νέων μεταϋλικών με βελτιωμένη διαπερατότητα και μηχανικές ιδιότητες. Χρησιμοποίησαν 3D εκτυπωμένες νάιλον auxetic δομές για να τροποποιήσουν το μέγεθος και το σχήμα των πόρων των υφασμάτων, βελτιώνοντας τη συμπεριφορά τάσης-παραμόρφωσης έως και 60 φορές και επιτυγχάνοντας μια σταθερή σύνδεση μεταξύ των δύο υλικών.

Επιπλέον, η εργασία των Quan κ.α. [49] ανέδειξε το χαμηλό κόστος και την ταχεία κατασκευή ενός θερμοπλαστικού πολυμερούς ενισχυμένου με ανθρακόνημα auxetic δομές μέσω της διαδικασίας FDM. Τα προϊόντα αυτά παρουσίασαν αυξημένη αντοχή σε θλίψη, βελτιωμένη απορρόφηση ενέργειας και ικανότητα αποτροπής διάδοσης ρωγμών σε σύγκριση με τις καθαρές PLA auxetic δομές.

Οι Vyavahare κ.α. [50], με τη βοήθεια αριθμητικών προσομοιώσεων, μελέτησαν τη μηχανική συμπεριφορά των 3D-εκτυπωμένων PLA και ABS re-entrant auxetic δομών και διαπίστωσε αλλαγές στην αντοχή τους σε σχέση με τις παραμέτρους εκτύπωσης. Οι Lvov κ.ά. [51] ανέπτυξαν μια auxetic κυψελοειδή δομή ικανή να αυξήσει την αντοχή σε θλίψη χαμηλού κύκλου έως και δύο φορές σε σύγκριση με παρόμοια μη-auxetic δομή, επιδεικνύοντας καλύτερη κατανομή φορτίου μετά από κυκλικές δοκιμές και υψηλότερη ικανότητα απόσβεσης ενέργειας.

Ακόμα, οι Gohar κ.ά. [52], οι οποίοι μελέτησαν την συμπεριφορά νέων τοπολογικά βελτιστοποιημένων αυξητικών δομών υπό θλιπτική φόρτιση, με κύριο στόχο την ανάπτυξη και βελτιστοποίηση αυτών των δομών ώστε να παρουσιάσουν ανώτερες μηχανικές ιδιότητες. Η δημιουργία των αυξητικών δομών έγινε με την τεχνολογία FDM όπως φαίνεται παρακάτω στο σχήμα 2.3.1.



Σχήμα 2.3.1 *Παρουσιάζονται αυξητικές δομές κατασκευασμένες με FDM 3d printer (a) Co-axial joints structure, (b) non-axial joints structure, (c) Curved walls structure, and (d) Mixed star structure [52]*

Από τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας FDM είναι η ευκολία που μπορούν να δημιουργηθούν auxetic δομές και να τροποποιηθούν παράμετροι για τη μελέτη της επίδρασης των γεωμετρικών χαρακτηριστικών στις ιδιότητες των δομών. Όμως τα ζητήματα που σχετίζονται με την προσθετική κατασκευή (AM) μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τις μηχανικές ιδιότητες των εκτυπωμένων υλικών και δομών, επομένως πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τη διαδικασία σχεδιασμού. Η ακρίβεια και η πιστότητα ενδέχεται να επηρεάσουν το κλάσμα όγκου και την κατανομή των εκτυπωμένων υλικών, ενώ παράγοντες όπως η ανισοτροπία, η πορώδης δομή, οι ατέλειες ή τα ελαττώματα στην επιφάνεια διαδραματίζουν επίσης σημαντικό ρόλο.

Η επίδραση του προσανατολισμού κατασκευής μπορεί να φαίνεται ασήμαντη, αλλά συνδέεται άμεσα με τον σχεδιασμό αυξητικών γεωμετριών. Μηχανικές ιδιότητες, όπως η αντοχή σε εφελκυσμό και το μέτρο ελαστικότητας, αυξάνονται καθώς αυξάνεται η γωνία προσανατολισμού κατασκευής των δοκιμίων εφελκυσμού. Αυτό συμβαίνει επειδή η σύνδεση μεταξύ των στρώσεων και το φαινόμενο των βαθμίδων οδηγούν σε απώλεια αντοχής για τις περισσότερες διαδικασίες AM που βασίζονται σε πολυμερή.[53]

Επιπλέον, εξίσου σημαντική είναι η επιλογή των παραμέτρων εκτύπωσης, όπως η θερμοκρασία εξώθησης, η ταχύτητα εκτύπωσης, το ποσοστό πλήρωσης και η διάταξη των στρώσεων, παίζει καθοριστικό ρόλο στις τελικές μηχανικές ιδιότητες των παραγόμενων auxetic δομών. Η βελτιστοποίηση αυτών των παραμέτρων μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένη αντοχή, βελτιωμένη ομοιομορφία στη δομή και ελαχιστοποίηση των ελαττωμάτων που σχετίζονται με την προσθετική κατασκευή.

Ακόμη, η χρήση σύνθετων υλικών και πολυμερών ενισχυμένων με νανοσωματίδια ή ίνες μπορεί να βελτιώσει σημαντικά τις ιδιότητες, επιτρέποντας καλύτερη αντοχή σε φορτία και βελτιωμένη ανθεκτικότητα σε δυναμικές καταπονήσεις. Οι πολύλειτουργικές δυνατότητες που προκύπτουν από τη χρήση τέτοιων υλικών ενισχύουν τη δυνατότητα εφαρμογών σε διάφορους τομείς.

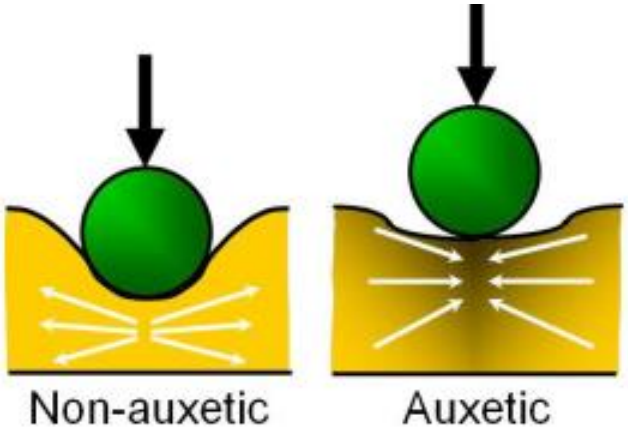
Συνοψίζοντας, η προσθετική κατασκευή αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία για την ανάπτυξη auxetic δομών με μοναδικά χαρακτηριστικά και προσαρμοσμένες μηχανικές ιδιότητες. Ωστόσο, είναι απαραίτητο να λαμβάνονται υπόψη οι διάφοροι περιορισμοί και οι παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα των τελικών προϊόντων, ώστε να εξασφαλιστεί η βέλτιστη απόδοση και η αξιοπιστία των κατασκευασμένων δομών.

2.4 Γενικές Ιδιότητες Αυξητικών Δομών

Τα αυξητικά υλικά όπως αναφέρθηκε και παραπάνω προσφέρουν μοναδικές ιδιότητες σε σύγκριση με τα κοινά υλικά. Η κλασική θεωρεία ελαστικότητας προβλέπει ότι η αυξητικότητα των υλικών οδηγεί σε βελτιώσεις σε ορισμένες μηχανικές ιδιότητες, όπως η αυξημένη αντοχή σε θραύση σε επίπεδη παραμόρφωση, ο αυξημένος συντελεστής, η αντίδραση σε εντυπώματα, η σκληρότητα κατά την θραύση και η βελτιωμένη ακουστική απόκριση σε σύγκριση με τα συμβατικά υλικά.

Τα αυξητικά υλικά παρουσιάζουν ενδιαφέρον λόγω της νέας συμπεριφοράς που εμφανίζουν υπό παραμόρφωση, καθώς και επειδή πολλές άλλες ιδιότητες των υλικών μπορούν να βελτιωθούν χάρη στον αρνητικό λόγο Poisson. Στην περίπτωση που ένα αντικείμενο προσκρούει σε ένα μη αυξητικό υλικό, το υλικό ακριβώς κάτω από το σημείο της πρόσκρουσης ρέει προς την πλευρική κατεύθυνση, οδηγώντας σε μείωση της πυκνότητας και, συνεπώς, σε μείωση της αντίστασης σε εντυπώματα.

Αντίθετα, σε ένα αυξητικό υλικό, το υλικό ρέει προς την περιοχή της πρόσκρουσης λόγω της πλευρικής συστολής που συνοδεύει τη διαμήκη συμπίεση από το αντικείμενο που προσκρούει. Έτσι, το αυξητικό υλικό πυκνώνει υπό την πρόσκρουση τόσο στη διαμήκη όσο και στην εγκάρσια κατεύθυνση, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 2.4.1, με αποτέλεσμα την αυξημένη αντίσταση.



Σχήμα 2.4.1 *Αντίσταση σε κρούση ενός μη-αυξητικού και αυξητικού υλικού. [54]*

Επίσης, λόγω της ιδιότητας τους να διαστέλλονται υπό συμπίεση, επιτρέπουν ομοιόμορφη κατανομή της δύναμης και σταδιακή απορρόφηση ενέργειας αντί για απότομη αποτυχία. Πιο συγκεκριμένα αντί να καταρρέουν σε ένα σημείο, διαχέουν την ενέργεια σε όλη την δομή, αποφεύγοντας αιχμές τάσεων λειτουργώντας ως 'αποσβεστήρας' μειώνοντας τη μεταφορά ισχυρών φορτίων σε άλλα μέρη.

Επιπλέον, τα αυξητικά υλικά παρουσιάζουν εξαιρετική συμπεριφορά στην ακουστική απόκριση, και έχει διαπιστωθεί ότι σε συχνότητες έως 1600Hz, οι αυξητικές μορφές πολυμερών και μεταλλικών αφρών παρουσιάζουν αυξημένη ακουστική απορρόφηση σε σύγκριση με τα συμβατικά υλικά. Μια περαιτέρω μελέτη εξέτασε την απόσβεση υπερήχων του αυξητικού UHMWPE σε σύγκριση με μια μικροπορώδη μορφή UHMWPE με θετικό λόγο του Poisson και ισοδύναμη πυκνότητα, καθώς και με UHMWPE που είχε μορφοποιηθεί με συμπίεση. Αυτή η ιδιότητα είναι σημαντική για αρχιτεκτονικές και βιομηχανικές εφαρμογές, καθώς και για τη βελτίωση της άνεσης σε μεταφορικά μέσα και κτιριακές κατασκευές.

Μια ακόμα αξιοσημείωτη γενική ιδιότητα είναι η προσαρμοστικότητα των αυξητικών υλικών. Μέσω κατάλληλης σχεδίασης της γεωμετρίας και της σύνθεσης των υλικών τους, μπορούν να προσαρμόζονται σε συγκεκριμένες συνθήκες φόρτισης, βελτιώνοντας τη συνολική τους απόδοση. Αυτή η δυνατότητα επιτρέπει τη χρήση τους σε προσαρμοζόμενες και έξυπνες δομές που ανταποκρίνονται δυναμικά στις μεταβαλλόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες. [55]

2.5 Συμπεριφορά και ανάλυση αυξητικών δομών

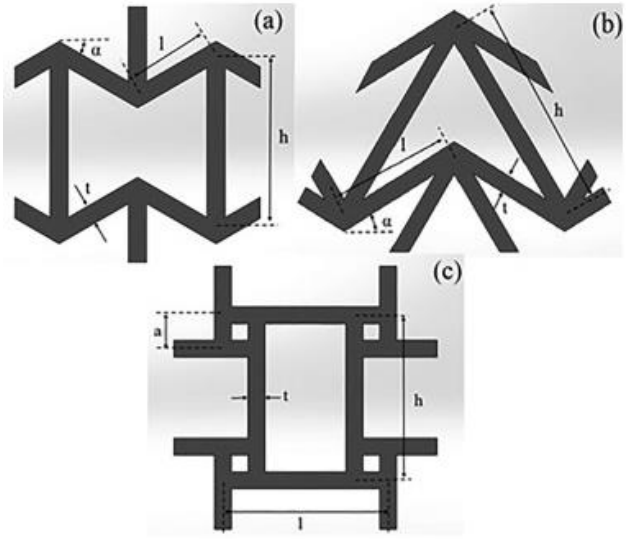
Γενικότερα οι αυξητικές δομές – γεωμετρίες προκύπτουν συνεχώς μέσω έρευνας και υπολογιστικών προσομοιώσεων ανάλογα με την εφαρμογή. Συνεπώς, η ανάγκη για αποτελεσματικότερη απορρόφηση ενέργειας σε εφαρμογές που η κρούση είναι κρίσιμη έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη κι μελέτη δομών με αυξητική συμπεριφορά. Τα τελευταία χρόνια η αξιοποίηση των αυξητικών δομών έχει ενισχυθεί με την πρόοδο στις τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής (Additive Manufacturing), που δίνει την δυνατότητα δημιουργίας σύνθετων γεωμετριών.

Οι διαφορετικές τοπολογίες auxetic δομών, όπως re-entrant honeycombs, chiral structures, arrowhead και 3D auxetic lattices, παρουσιάζουν ποικίλες μηχανικές συμπεριφορές, επηρεάζοντας τον τρόπο παραμόρφωσης και την αποτελεσματικότητα στη διάχυση της ενέργειας κατά την κρούση. Στο παρόν κεφάλαιο, θα αναλυθούν βασικές κατηγορίες αυξητικών δομών που έχουν μελετηθεί για απορρόφηση ενέργειας σε χαμηλές και υψηλές ταχύτητες κρούσης και θα παρουσιαστούν κάποια επιλεγμένα case studies με πειραματικές μελέτες που αποδεικνύουν την αποτελεσματικότητά τους.

Επιπλέον ορισμένα case studies εστιάζουν στην άμεση σύγκριση τριών έως πέντε αυξητικών δομών, αναλύοντας τις διαφορές τους στην παραμόρφωση, στην αντοχή τους, και στην απορρόφηση ενέργειας μέσω πειραματικών δοκιμών υπό στατική και δυναμική φόρτιση, καθώς και υπολογιστικών προσομοιώσεων που επιτρέπουν την ανάλυση της συμπεριφοράς τους. Στόχος είναι η κατανόηση τον περιορισμών και των πλεονεκτημάτων κάθε δομής προσδιορίζοντας την βέλτιστη επιλογή για την εφαρμογή του προφυλακτήρα ενός αυτοκινήτου. Μέσα από αυτή την διαδικασία, αναδεικνύεται η σημασία της γεωμετρίας και τις τοπολογίας στη βελτιστοποίηση της απόδοσης των αυξητικών δομών για την απορρόφηση κρουστικών φορτίων.

2.5.1 Δομές Re-entrant, Arrowhead, Anti-tetra Chiral

Η συγκεκριμένη έρευνα από τους Najafi κ.ά. [56] επικεντρώνεται στη πειραματική διερεύνηση της απορρόφησης ενέργειας τριών διαφορετικών γεωμετρικών τύπων αυξητικών δομών (Re-entrant, Arrowhead, Anti-tetra Chiral) που φαίνονται στο (σχήμα 2.5.1.1). Η κατασκευή των δοκιμίων μελέτης έγινε με προσθετική κατασκευή, ενώ η μηχανική τους συμπεριφορά μελετήθηκε μέσω δοκιμών αξονικής θλίψης και χαμηλής ταχύτητας πρόσκρουσης.



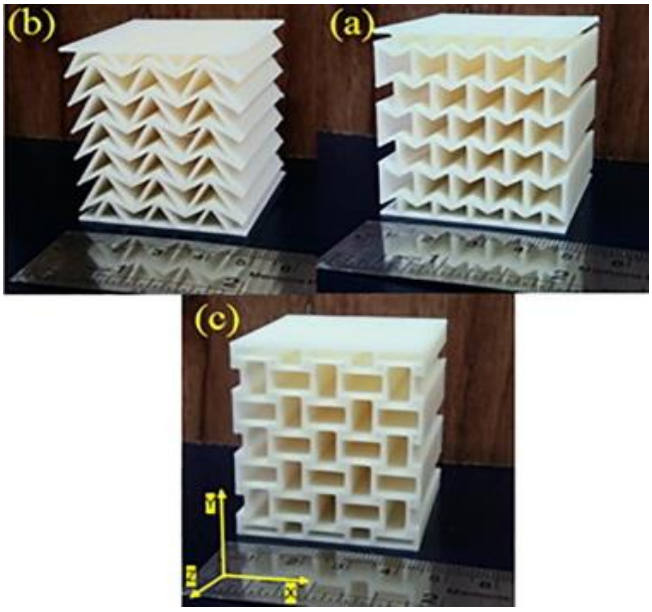
Σχήμα 2.5.1.1 *Προφίλ κάθε δομής a) re-entrant, b) arrowhead, c)anti- tetra chiral.*

Οι διαστάσεις σχεδιασμού κάθε δομής αναφέρονται στον παρακάτω πίνακα 2.5.1.1:

Structure -δομή	h (mm)	I (mm)	a (mm)	t (mm)	a (°)
Re- entrant	10	5	-	1	-30
Arrowhead	13.50	8.40	-	1	30
Anti- tetra chiral	9.80	9.80	2	1	-

Πίνακας 2.5.1.1 *Διαστάσεις δομών.*

Η κατασκευή των δοκιμίων πραγματοποιήθηκε με εκτυπωτή Quantom -2025 ο οποίος είναι κατάλληλος για παραγωγή πολυμερών δομών υψηλής αντοχής και το πολυμερές που χρησιμοποιήθηκε είναι ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene). Για την ομοιόμορφη φόρτιση κατά την διάρκεια των δοκιμών, προστέθηκαν δυο επίπεδες επιφάνειες πάχους 1mm στα άκρα κάθε δομής για την σωστή μηχανική απόκριση όπως φαίνεται και στο (σχήμα 2.5.1.2). Επιπλέον, για την εξακρίβωση των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού, διεξήχθησαν δοκιμές εφελκυσμού σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D638 ώστε να προσδιοριστούν ο συντελεστής ελαστικότητας, το όριο διαρροής και η πυκνότητα του ABS. Οι πληροφορίες για τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού που χρησιμοποιήθηκε αναφέρονται στον πίνακα 2.5.1.2.

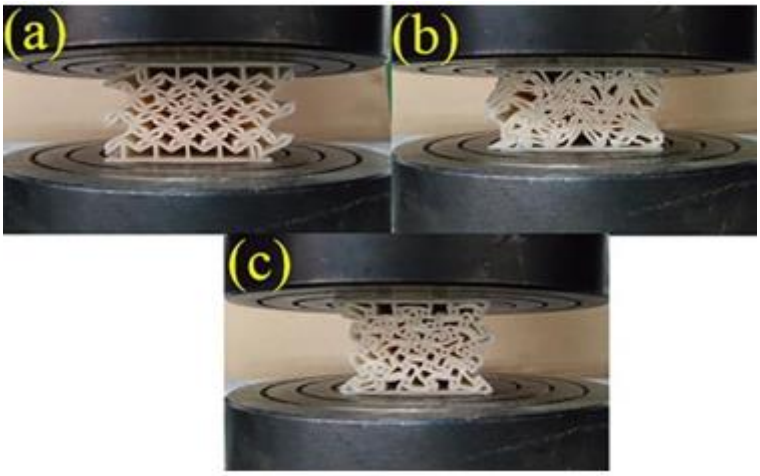


Σχήμα 2.5.1.2 *Κατασκευασμένα μοντέλα, a) re-entrant, b) arrowhead, c)anti- tetra chiral.*

Base material	Young's modulus (MPa)	Yield stress (MPa)	Posson's ratio	Density (g/c^3m^3)
ABS	1500	36	0.35	1.00

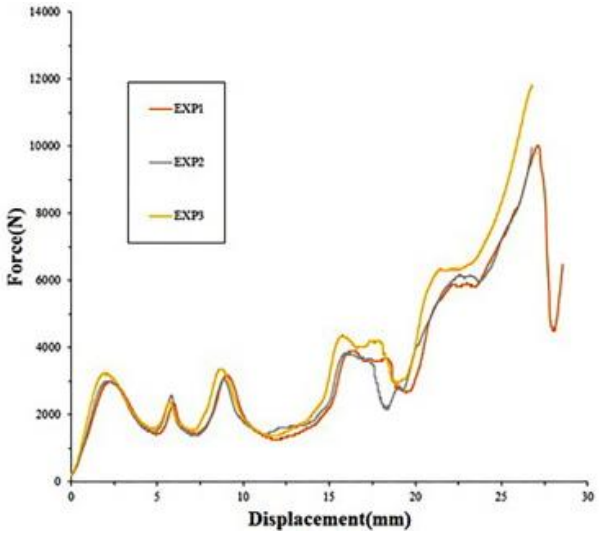
Πίνακας 2.5.1.2 *Ιδιότητες υλικού ABS.*

Το πειραματικό μέρος για την δοκιμή θλίψης πραγματοποιήθηκε σε μηχανή δοκιμών WDW-300E Universal, όπου τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε μονοαξονική θλίψη με σταθερή ταχύτητα παραμόρφωσης 2mm/min. Η φόρτιση συνεχίστηκε μέχρι η δομή να μειωθεί στο 50% του αρχικού ύψους της, επιτρέποντας την αξιολόγηση της μηχανικής της συμπεριφοράς. Στόχος σε αυτή την δοκιμή είναι η σύγκριση της συμπεριφοράς των αυξητικών δομών υπό σταδιακή θλιπτική φόρτιση (σχήμα 2.5.1.3), για να γίνει κατανοητός ο τρόπος κατάρρευσης και απορρόφησης ενέργειας των δομών.



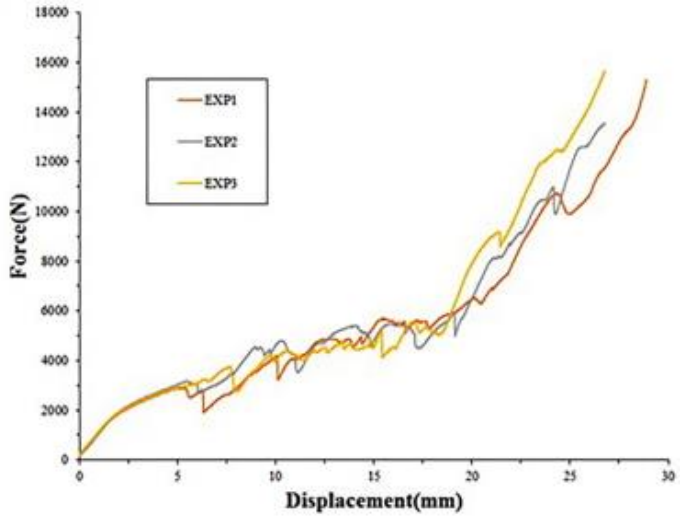
Σχήμα 2.5.1.3 *Παραμορφωμένα σχήματα των δομών μετά την δοκιμή ημι-στατικής φόρτισης, a) re-entrant, b) arrowhead, c)anti- tetra chiral.*

Συνεπώς έγινε καταγραφή, στις καμπύλες δύναμης-μετατόπισης, ώστε να γίνει η ανάλυση της απορρόφησης ενέργειας και της μηχανικής απόκρισης κάθε δομής. Παρατηρείται διαφορά στον τρόπο κατάρρευσης και της καταστροφής των δομών που επηρεάζουν την απορρόφηση ενέργειας. Αρχικά, σε όλες τις δομές υπάρχει μια περιοχή στην οποία η σχέση δύναμης-μετατόπισης είναι γραμμική, μετά από αυτό στην επόμενη δομή υπάρχει μια συμπεριφορά κατάρρευσης, με συχνή άνοδο και πτώση των ποσών δύναμης.



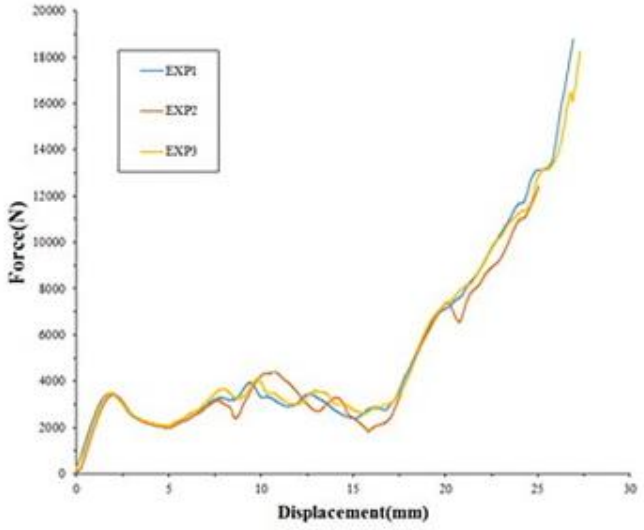
Σχήμα 2.5.1.4 *Διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης για την δομή re-entrant υπό στατική φόρτιση.*

Στην συγκεκριμένη δομή παρατηρείται σταδιακή κατάρρευση επιπέδων, που σημαίνει ότι οι επιμέρους κυψελοειδείς μονάδες της κατέρρεαν διαδοχικά κατά την διάρκεια της θλίψης, αντί για ομοιόμορφη κατάρρευση. Αυτό προκάλεσε διαδοχικές αυξομειώσεις στη δύναμη κατά την συμπίεση, καθώς κάθε επίπεδο αντιστεκόταν στιγμιαία στην φόρτιση πριν αποτύχει, και γ' αυτό τον λόγο παρατηρούνται έντονες διακυμάνσεις στην καμπύλη δύναμης – μετατόπισης (σχήμα 2.5.1.4). Προς το τέλος της δοκιμής, η καμπύλη δείχνει απότομη αύξηση στη δύναμη, καθώς η δομή φτάνει στη φάση συμπύκνωσης , όπου τα κυψελοειδή στοιχεία δεν μπορούν να παραμορφωθούν ελεύθερα.



Σχήμα 2.5.1.5 *Διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης για την δομή arrowhead υπό στατική φόρτιση.*

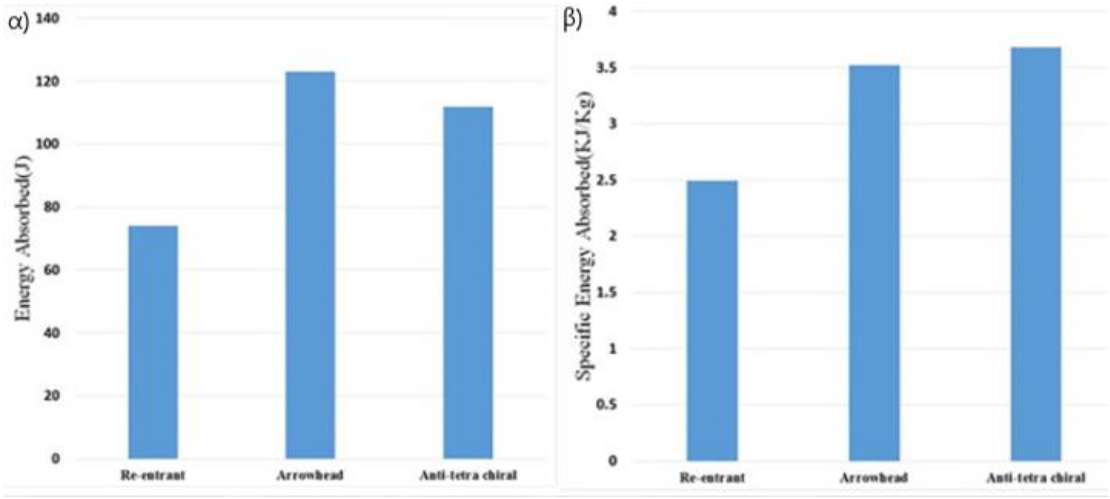
Η Arrowhead δομή είχε συνολικά την μεγαλύτερη απορρόφηση ενέργειας σε σύγκριση με τις άλλες δομές που μελετήθηκαν εμφανίζοντας ομαλότερη εξέλιξη της δύναμης. Αυτό υποδεικνύει υψηλή ικανότητα απορρόφησης κρούσης και θλίψης, καθιστώντας την ιδιαίτερα αποδοτική για εφαρμογές που απαιτούν αντοχή σε καταπονήσεις. Επίσης, από το διάγραμμα (σχήμα 2.5.1.5) φαίνεται ότι είχε σταθερή συμπεριφορά κατά την διάρκεια της θλίψης που σημαίνει ότι αντιστάθηκε στην κατάρρευση με ομοιόμορφο τρόπο, χωρίς απότομες μεταβολές στην δύναμη και ξαφνικές αστοχίες. Στη φάση συμπύκνωσης, η δύναμη αυξάνεται απότομα, παρόμοια με τη Re-entrant δομή.



Σχήμα 2.5.1.6 *Διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης για την δομή anti-tetra chiral υπό στατική φόρτιση.*

Η Anti-tetra Chiral δομή παρουσίασε σταθερή μηχανική απόκριση, με την δύναμη για την συμπίεση να παραμένει σχεδόν σταθερή στην διάρκεια της διαδικασίας χωρίς μεγάλες διακυμάνσεις (σχήμα 2.5.1.6). Η δομή επιδεικνύει σταθερή απόκριση, γεγονός που υποδηλώνει ότι η κατανομή των φορτίων είναι ομοιόμορφη. Η τελική συμπύκνωση αναφέρεται στο στάδιο, όπου η δομή έχει φτάσει σε υψηλά επίπεδα παραμόρφωσης, και οι επιμέρους μονάδες έχουν αρχίσει να εφάπτονται πλήρως, οδηγώντας σε απότομη αύξηση της δύναμης λόγω της απώλειας χώρου παραμόρφωσης όπως και στις άλλες δομές.

Η συνολική απορρόφηση ενέργειας κάθε δοκιμίου υπολογίστηκε μέσω του εμβαδού κάτω από την καμπύλη δύναμης – μετατόπισης. Επιπλέον, για την δίκαιη σύγκριση μεταξύ των διαφορετικών δομών, χρησιμοποιήθηκε η παράμετρος ειδική απορρόφηση ενέργειας (Specific Energy Absorption – SEA), που είναι η απορρόφηση ενέργειας ανά μονάδα μάζας της δομής. Αυτό έχει σημασία, καθώς διαφορετικές δομές μπορεί να έχουν διαφορετικά βάρη, επομένως η σύγκριση μόνο της συνολικής απορρόφησης ενέργειας δεν θα ήταν ακριβής. Τα αποτελέσματα (σχήμα 2.5.1.7) έδειξαν ότι η Arrowhead δομή είχε 66% μεγαλύτερη απορρόφηση ενέργειας από τη Re-entrant και 10% μεγαλύτερη από την Anti-tetra Chiral.



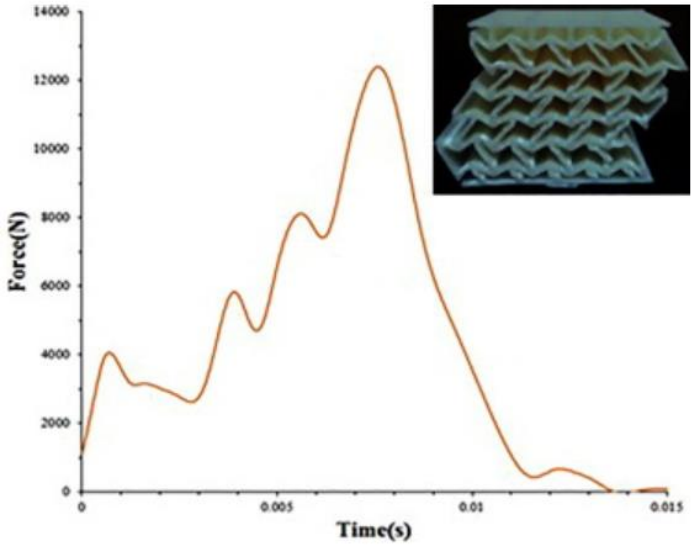
Σχήμα 2.5.1.7 *α)Απορρόφηση ενέργειας των δοκιμασμένων δομών., β) Ειδική απορρόφηση ενέργειας των δοκιμασμένων δομών.*

Το δεύτερο πείραμα, χαμηλής ταχύτητας πρόσκρουσης διεξήχθη με σύστημα πρόσκρουσης ελεύθερης πτώσης (Drop Weight Impact Test). Το σύστημα περιλάμβανε ένα κυλινδρικό πλακόστρωμα διαμέτρου 200 mm και συνολικού βάρους 9.1 kg. Το ύψος πτώσης ορίστηκε στα 130 cm το οποίο αντιστοιχεί σε μία θεωρητική κινητική ενέργεια 115,9 J κατά την πρόσκρουση. Επίσης χρησιμοποιήθηκε ένας επιταχυνσιογράφος για την

καταγραφή της επιτάχυνσης του σφυριού κατά την σύγκρουση, και οι τιμές δύναμης υπολογίστηκαν από τη σχέση:

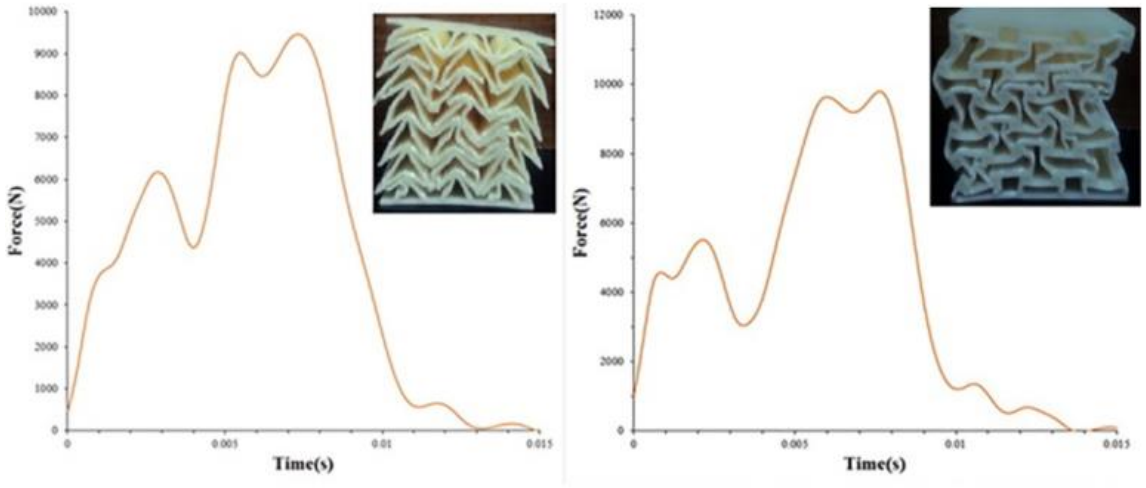
$$F = m \times a \tag{2.5.1.1}$$

- m: η μάζα του σφυριού
- α: η επιτάχυνση κατά την πρόσκρουση



Σχήμα 2.5.1.8 *Διάγραμμα δύναμης-χρόνου για την re-entrant δομή προερχόμενο από δοκιμή πρόσκρουσης με βάρος.*

Η Re-entrant δομή παρουσίασε υψηλές μέγιστες δυνάμεις πρόσκρουσης, μπόρεσε να αντέξει μεγαλύτερα φορτία κατά την πρόσκρουση σε σύγκριση με τις άλλες δομές όπως φαίνεται και στην (σχήμα 2.5.1.8). Ωστόσο, η σταδιακή κατάρρευση ήταν παρόμοια με εκείνη που παρατηρήθηκε στην αξονική θλίψη, αυτό σημαίνει ότι η δομή υπέστη σταδιακή παραμόρφωση χωρίς ξαφνική απώλεια αντοχής. Στο τέλος η δύναμη σταθεροποιείται και μειώνεται που σημαίνει ότι η δομή έχει παραμορφωθεί πλήρως .



Σχήμα 2.5.1.9 *Διάγραμμα δύναμης-χρόνου για την a)arrowhead και b) anti-tetra chiral προερχόμενο από δοκιμή πρόσκρουσης με βάρος.*

Οι Arrowhead και Anti-tetra Chiral παρουσίασε πιο ομαλή και ελεγχόμενη απορρόφηση ενέργειας, χωρίς απότομες διακυμάνσεις στην δύναμη όπως φαίνεται και στο (σχήμα 2.5.1.9). Αυτό οφείλεται στην σταδιακή κατανομή των φορτίων, αποφεύγοντας υψηλές εντάσεις δυνάμεων που μπορούν να οδηγήσουν σε ξαφνική αστοχία. Τέλος, η δομή που συνολικά παρουσίασε καλύτερή απόδοση, συνδυάζοντας αποτελεσματική απορρόφηση ενέργειας και ελεγχόμενη απόκριση στην πρόσκρουση είναι η Anti-tetra δομή λόγω της

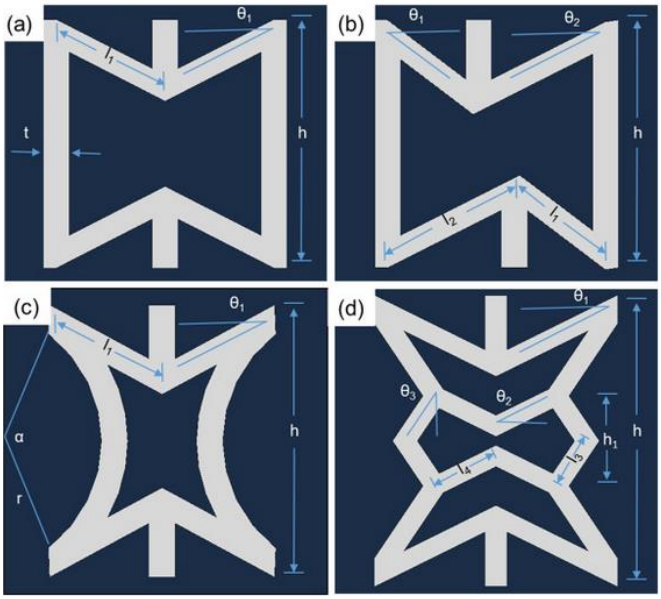
ισορροπημένης συμπεριφοράς της σε όλες τις δοκιμές. Ακόμα η Arrowhead δομή ήταν πιο αποδοτική στη στατική δοκιμή που εμφάνισε την υψηλότερη ενέργεια απορρόφησης ενώ η Re-entrant παρουσίασε βελτιωμένη απόδοση στην πρόσκρουση.

2.5.2 Δομές Non-Axial Joints structure, Curved Wall Structure, Mixed Star structure

Η συγκεκριμένη έρευνα από τους Gohar κ.ά. [52] επικεντρώνεται στην σχεδίαση, πειραματική ανάλυση και αριθμητική προσομοίωση νέων αυξητικών δομών, οι οποίες έχουν στόχο την βελτίωση της ακαμψίας και της ικανότητας απορρόφησης ενέργειας. Σχεδιάστηκαν τρείς νέες αυξητικές δομές και συγκρίθηκαν με την συμβατική αναδιπλούμενη κυψελοειδή δομή (Co-Axial Joints Structure). Οι νέες δομές είναι:

- Non-Axial Joints Structures (NAJS): Τροποποιήθηκε η θέση των αρθρώσεων της αναδιπλούμενης δομής ώστε να είναι εκτός άξονα, με στόχο την αύξηση της αυξητικότητας και της ακαμψίας.
- Curved Wall Structure (CWS): Αντικαταστάθηκαν οι ευθείες κάθετες πλευρές με καμπύλες, ώστε να ενισχυθεί η αυξητικότητα μέσω της γεωμετρίας.
- Mixed Star Structures (MSS): Συνδυασμός στοιχείων από διαφορετικές αυξητικές δομές, με στόχο την βελτίωση της απορρόφησης ενέργειας.

Στο (σχήμα 2.5.2.1) παρουσιάζονται οι 4 αυξητικές δομές, κάθε μία με διαφορετικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά.



Σχήμα 2.5.2.1 *Σχέδια κυττάρων μονάδας:(a) Co-axial Joints Structure, (b) Curved Wall Structure, (c) Non-axial joints Structure, and (d) Mixed Star Structure.*

Η σχετική πυκνότητα των δομών (ratio of solid material to total volume) υπολογίστηκε μέσω μαθηματικών σχέσεων, βασισμένων στην θεωρία Gibson and Ashby. Οι υπολογισμοί έγινα για να εξασφαλιστεί η καλύτερη ισορροπία μεταξύ αντοχής και χαμηλού βάρους. Οι διαστάσεις σχεδιασμού αναφέρονται στον παρακάτω πίνακα 2.5.2.1:

	Relative Density	h (mm)	h_1 (mm)	l_1 (mm)	l_2 (mm)	l_3 (mm)	l_4 (mm)	t (mm)	θ_1	θ_2	θ_3
CAJS	0.3	10	-	5.2	-	-	-	1	30	-	-
NAJS	0.3	10	-	6	4.5	-	-	1	40	30	-
CWS	0.65	10	-	5,2	-	-	-	1	30	-	-
MSS	0.43	15	4.98	5.75	6.6	2.88	3.32	1	30	30	30

Πίνακας 2.5.2.1. *Σχεδιαστικές παράμετροι για τα κύτταρα μονάδας.*

Αρχικά, τα CAD μοντέλα των αυξητικών δομών σχεδιάστηκαν με το λογισμικό Abaqus/CAE και στην συνέχεια τα αρχεία STL μεταφέρθηκαν σε εκτυπωτή FDM CREATBOT για την κατασκευή των δειγμάτων. Οι δομές σχεδιάστηκαν ως επαναλαμβανόμενες κυψελοειδείς μονάδες (unit cells), οι οποίες ενώθηκαν για να σχηματίσουν μεγαλύτερα δοκίμια με συνολικές διαστάσεις 40 x 40 x 45 mm. Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε ήταν ABS, λόγω της υψηλής αντοχής και ανθεκτικότητας που διαθέτει. Οι μηχανικές του ιδιότητες δίνονται από τον πίνακα 2.5.2.2 καθώς και στον πίνακα 2.5.2.3 οι παράμετροι που δόθηκαν για την εκτύπωση.

Material	Young's Modulus (GPa)	Yield Stress (MPa)	Poisson's Ratio	Density (gm/cm^3)
ABS	1.6	52	0.35	1.05

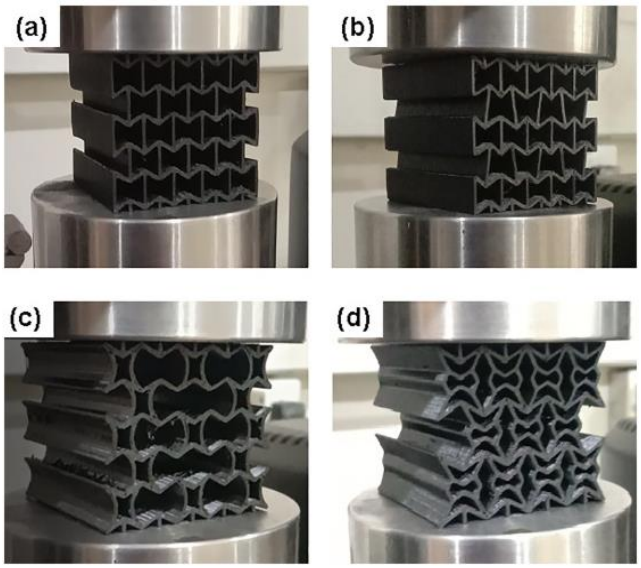
Πίνακας 2.5.2.2 *Μηχανικές ιδιότητες ABS.*

Parameter	Value
Nozzle Diameter (mm)	0.75
Layer Height (mm)	0.5
Printing speed (mm/s)	30
Fill density (%)	100
Nozzle temperature (ºC)	230
Bed temperature (ºC)	100

Πίνακας 2.5.2.3 *Παράμετροι εκτύπωσης FDM.*

Στην συνέχεια προχώρησε η πειραματική φάση θλιπτικών δοκιμών για την αξιολόγηση των μηχανικών ιδιοτήτων των αυξητικών δομών και την σύγκριση τους με τα αποτελέσματα της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων (FEA). Οι δοκιμές θλίψης έγιναν σε μηχάνημα Instron UTM 5567, με σταθερή ταχύτητα συμπίεσης 2 mm/min, ώστε η φόρτιση να εφαρμόζεται σταδιακά και να καταγραφεί με ακρίβεια η συμπεριφορά των δομών. Κατά την διάρκεια της δοκιμής, μετρήθηκαν και καταγράφηκαν οι καμπύλες δύναμης- μετατόπισης, οι οποίες στην συνέχεια μετατράπηκαν σε καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης.

Για κάθε τύπο δομής εκτυπώθηκαν τρία δείγματα με στόχο να ληφθεί ένας μέσος όρος των αποτελεσμάτων και να διασφαλιστεί η στατική ακρίβεια. Κάθε δείγμα τοποθετήθηκε ανάμεσα σε δυο μεταλλικές πλάκες συμπίεσης, οι οποίες εξασφάλισαν ομοιόμορφη κατανομή φορτίου, όπως φαίνεται στο παρακάτω (σχήμα 2.5.2.2):

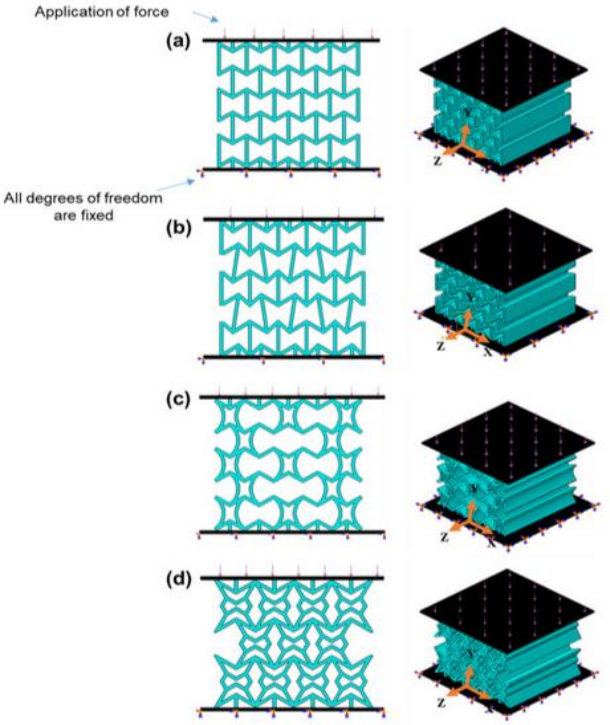


Σχήμα 2.5.2.2 *Δοκιμή συμπίεσης δομών αυξητικών που κατασκευάστηκαν με FDM: (a) Co-axial joints structure, (b) Non-axial joints structure, (c) Curved walls structure, and (d) Mixed star structure.*

Επιπλέον, για την ανάλυση της συμπεριφοράς των αυξητικών δομών δημιουργήθηκαν αριθμητικά μοντέλα με την μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Analysis - FEA) στο λογισμικό Abaqus/CAE. Χρησιμοποιήθηκαν τριγωνικά στοιχεία τριών κόμβων κατάλληλα για την προσομοίωση των λεπτών

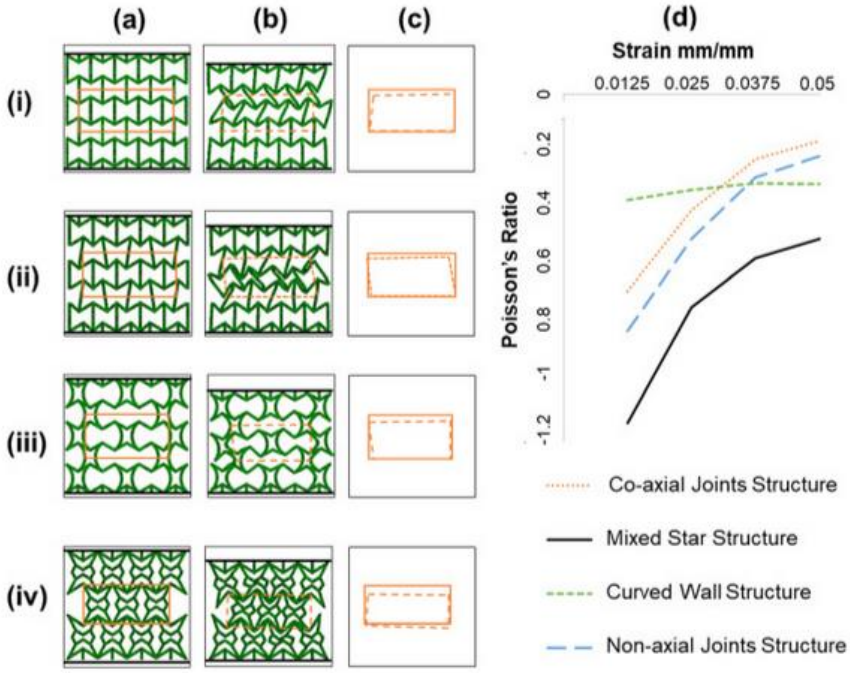
τοιχωμάτων των δομών. Για την προσομοίωση των πειραματικών δομών, τοποθετήθηκαν δύο άκαμπτα ελάσματα (rigid face sheets) στο άνω και κάτω μέρος κάθε δομής, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την εφαρμογή φορτίου.

Η κάτω επιφάνεια θεωρήθηκε πλήρως σταθερή, και στην πάνω επιφάνεια εφαρμόστηκε σταδιακή μετατόπιση 15 mm στην αρνητική κατεύθυνση του άξονα Y, προσομοιώνοντας την θλιπτική φόρτιση των πειραματικών δοκιμών. Στο (σχήμα 2.5.2.3) φαίνονται οι συνθήκες ορίων στην προσομοίωση FEA για κάθε δομή.



Σχήμα 2.5.2.3 *Συνθήκες ορίων που εφαρμόστηκαν στη προσομοίωση FEA: (a) Co-axial Joints Structure, (b) Curved Wall Structure, (c) Non-axial joints Structure, and (d) Mixed Star Structure.*

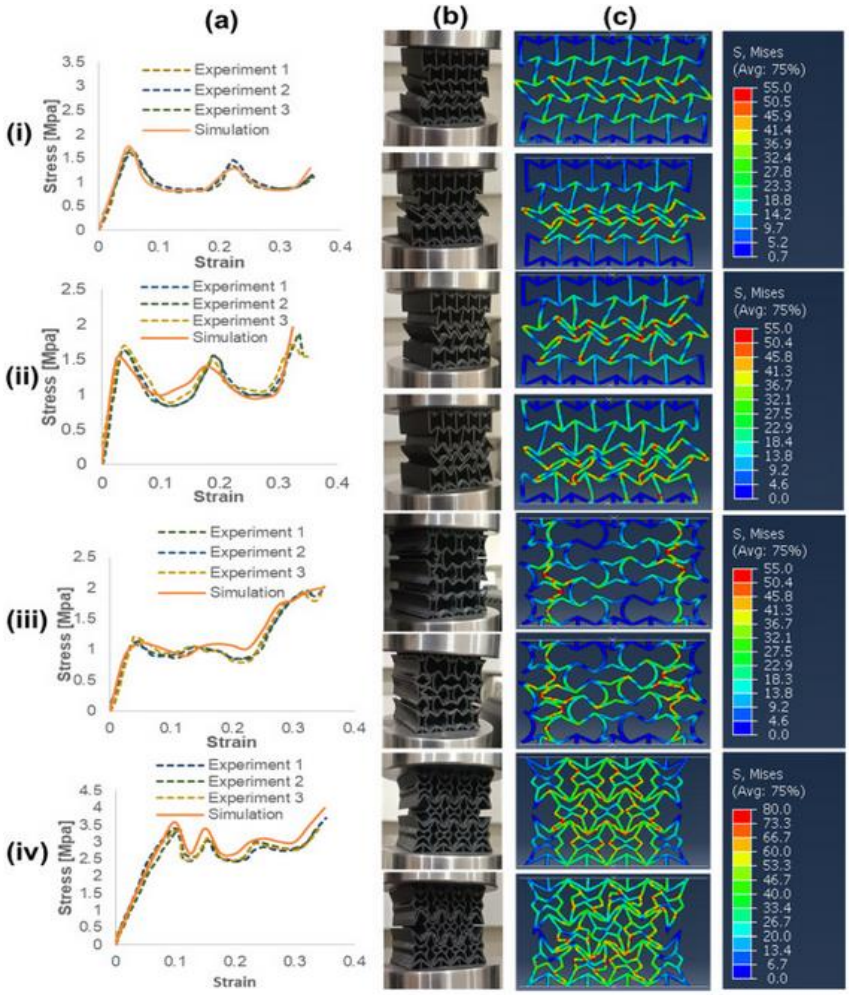
Για την εκτίμηση του λόγου Poisson (ν), χρησιμοποιήθηκε η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε σε προηγούμενες μελέτες αυξητικών δομών. Συνεπώς, ο λόγος Poisson υπολογίστηκε μέσω της αλλαγής των διαστάσεων ενός αντιπροσωπευτικού ορθογώνιου μπλοκ που τοποθετήθηκε στις δομές πριν και μετά την εφαρμογή του φορτίου όπως φαίνεται στο (σχήμα 2.5.2.4). Έγινε καταγραφή εικόνας κάθε δομής πριν και μετά τη θλίψη και αναλύθηκε η μεταβολή των εγκάρσιων και διαμηκών διαστάσεων μέσω ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας. Η αυξητική συμπεριφορά επιβεβαιώθηκε από τη μείωση του λόγου Poisson σε αρνητικές τιμές.



Σχήμα 2.5.2.4 *Co-axial Joints Structure, (ii) Curved Wall Structure, (iii) Non-axial joints Structure, (iv) Mixed Star Structure, (a) Εικόνες αυξητικών δομών σε επίπεδα παραμόρφωσης 0 mm/mm, (β) Εικόνες αυξητικών δομών σε επίπεδα παραμόρφωσης 0,05 mm/mm, (γ) Σύγκριση μεγέθους του ορθογωνίου μπλοκ σε διάστημα παραμόρφωσης 0 και 0,05 mm/mm, και (δ) Δείκτης Poisson των αυξητικών δομών στο διάστημα παραμόρφωσης 0–0,05 mm/mm.*

Από τα αποτελέσματα στην σύγκριση αυξητικότητας η Mixed Star Structure (MSS) εμφάνισε τον χαμηλότερο λόγο Poisson αποδεικνύοντας ότι είναι η πιο αυξητική από τις δομές που εξετάστηκαν. Η Non-Axial Joint Structure (NAJS) εμφάνισε αυξημένη αυξητικότητα σε σύγκριση με την Co-Axial Joints Structure (CAJS), επιβεβαιώνοντας ότι η μετατόπιση των αρθρώσεων επηρέασε θετικά την συμπεριφορά της δομής. Η Curved Wall Structure (CWS) παρουσίασε αρχικά χαμηλή αυξητικότητα αλλά μετά από συγκεκριμένο ποσοστό παραμόρφωσης (0,0375 mm/min strain) η αυξητική της συμπεριφορά έγινε πιο έντονη. Το συμπέρασμα είναι ότι οι σχεδιαστικές διαφοροποιήσεις βελτίωσαν την αυξητικότητα των δομών σε σύγκριση με την συμβατική αναδιπλούμενη δομή Co-Axial Joints Structure.

Κατά το πείραμα της θλίψης, οι δομές παραμορφώθηκαν και καταρρεύσαν με διαφορετικό τρόπο. Τα αριθμητικά μοντέλα από την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων επικυρώθηκαν με σύγκριση των πειραματικών και των προσομοιωμένων καμπύλων τάσης-παραμόρφωσης, δείχνοντας πολύ καλή συμφωνία. Οι καμπύλες πίεσης, καθώς και τα μοτίβα παραμόρφωσης καταγράφηκαν κατά την διάρκεια του FEA και των πειραματικών δοκιμών, και εμφανίζονται στο παρακάτω (σχήμα 2.5.2.5).



Σχήμα 2.5.2.5 *Co-axial Joints Structure, (ii) Curved Wall Structure, (iii) Non-axial joints Structure, (iv) Mixed Star Structure, (α) Σύγκριση καμπυλών τάσης-παραμόρφωσης μεταξύ πειραματικών και αποτελεσμάτων FEA, (β) Πειραματική παραμόρφωση των αυξητικών δομών υπό δοκιμή συμπίεσης, και (γ) Παραμόρφωση των αυξητικών δομών από FEA υπό δοκιμή συμπίεσης.*

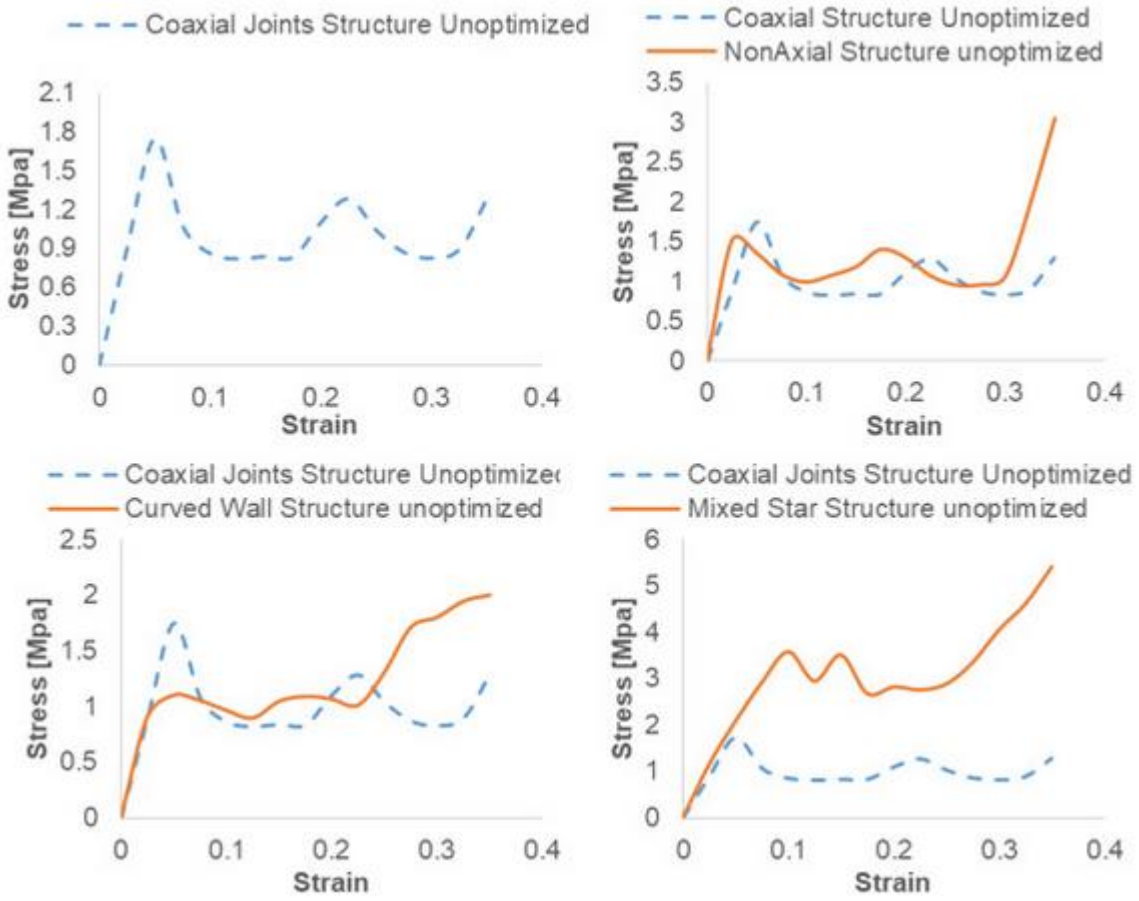
Παρατηρήθηκε ότι οι δομές CAJS και NAJS κατέρρευσαν σειρά προς σειρά. Όταν και οι δύο δομές συμπιέστηκαν κατά την ενδοεπίπεδη διεύθυνση, αρχικά σημειώθηκε κάμψη των τοιχωμάτων των κυψελών, η οποία ακολούθησε κατάρρευση μέσω ελαστικού λυγίσματος και στη συνέχεια πλαστική διαρροή. Επίσης συγκρίνοντας αυτή την συμπεριφορά με τις καμπύλες τάσης -παραμόρφωσης παρατηρήθηκε ότι οι τιμές της τάσης αυξάνονταν αρχικά, αλλά όταν ξεκινούσε η κατάρρευση της σειράς, οι τιμές της άρχισαν να μειώνονται, μέχρι το σημείο της ολικής κατάρρευσης της συγκεκριμένης σειράς, οπού τα τοιχώματα των κυψελών ερχόντουσαν σε επαφή μεταξύ τους. Από το σημείο αυτό και έπειτα, η επόμενη σειρά άρχιζε να φέρει το φορτίο, η δομή γινόταν ξανά πιο άκαμπτη και η καμπύλη άρχιζε να ανεβαίνει.

Στην δομή CWS η χρήση καμπύλων τοιχωμάτων οδήγησε σε ομοιόμορφη κατανομή τάσεων και παρατηρείται ότι οι διακυμάνσεις στην καμπύλη τάσης παραμόρφωσης δεν ήταν ιδιαίτερα έντονες. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι δομές δεν καταρρεύσαν σειριακά, αλλά όλες οι σειρές κυψελών παραμορφώθηκαν ταυτόχρονα έχοντας συλλογικά την κατανομή του εφαρμοζόμενου φορτίου. Αυτός είναι ο λόγος που οι πτώσεις στην καμπύλη ήταν ελάχιστες και η τάση αυξανόταν συνεχώς από 0mm/min παραμόρφωση έως 0,35mm/min.

Η συμπεριφορά της MSS ήταν σχεδόν παρόμοια με εκείνη της CWS, με την διαφορά ότι στην καμπύλη υπήρχαν δύο έντονες αυξομειώσεις μεταξύ 0,1 mm/min και 0.2 mm/min παραμόρφωσης. Αυτό πιθανότητα οφείλεται στον λυγισμό των τοιχωμάτων και όχι με την κατάρρευση μίας σειράς εμφανίζοντας τη μεγαλύτερη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας. Παρατηρήθηκε επίσης ότι και στις τέσσερις δομές, η κατάρρευση ξεκινούσε από το κέντρο, προχωρούσε προς το κινούμενο άκρο και τελικά κατέρρεε στο σταθερό άκρο.

Επιπλέον, πραγματοποιήθηκε σύγκριση των καμπύλων τάσης-παραμόρφωσης της συμβατικής δομής CAJS με εκείνες των νέων δομών. Διαπιστώθηκε ότι η αρχική κλίση της καμπύλης, τάσης-παραμόρφωσης

όλων των νέων δομών ήταν πιο απότομη σε σχέση με την συμβατική όπως φαίνεται στο παρακάτω (σχήμα 2.5.2.6).



Σχήμα 2.5.2.6 *Σύγκριση των ικανοτήτων απορρόφησης ενέργειας των συμβατικών και των νέων αυξητικών δομών.*

Επιπρόσθετα, οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας Young υπολογίστηκαν από τις προσομοιωμένες και τις πειραματικές καμπύλες τάσης παραμόρφωσης και παρουσιάζονται στο παρακάτω πίνακα 2.5.2.4.

Δομή	Young's Modulus (MPa)	Energy Absorption Capacity ($\times 10^4$ J/m^3)	Specific Energy Absorption (J/kg)
CAJS	36.01	0.348	11.04
NAJS	50.3 (+ 40%)	0.44 (+ 25.3%)	13.64
CWS	36.15	0.43 (+ 22.4%)	5.85
MSS	46.5 (+ 30%)	1.05 (+ 200%)	23.25 (+ 112%)

Πίνακας 2.5.2.4 *Μηχανικές ιδιότητες των συμβατικών και νέων δομών.*

Το μέτρο ελαστικότητας του CAJS βρέθηκε να είναι το χαμηλότερο, δηλαδή 36,01 MPa. Η NAJS παρουσίασε τη μεγαλύτερη τιμή, φτάνοντας τα 50,3 MPa (40% υψηλότερο από το συμβατικό CAJS), ακολουθούμενη από την MSS, της οποίας το μέτρο υπολογίστηκε στα 46,5 MPa (30% υψηλότερο από το CAJS). Τέλος, η δεύτερη NAJS είχε τιμή 36,15 MPa, δηλαδή 0,4% υψηλότερη από τη συμβατική δομή.

Επίσης, τα δοκίμια συμπιέστηκαν μέχρι να φτάσουν σε ένα επίπεδο παραμόρφωσης πυκνοποίησης, ώστε να εκτιμηθούν οι ικανότητες απορρόφησης ενέργειας των δομών. Η παραμόρφωση πυκνοποίησης είναι το σημείο όπου η κλίση της εφαπτομένης στην καμπύλη τάση-παραμόρφωσης γίνεται ίση με την κλίση της ελαστικής περιοχής της καμπύλης. Αντίθετα, ορίζεται ως το τελευταίο ελάχιστο πριν από τη ραγδαία αύξηση τάσης.

Με βάση τις δύο προσεγγίσεις, η παραμόρφωση πυκνοποίησης του CAJS υπολογίστηκε ως 0.35 για λόγους σύγκρισης, οι υπόλοιπες τρεις δομές υποβλήθηκαν επίσης σε συμπίεση μέχρι το ίδιο επίπεδο παραμόρφωσης. Οι ενεργειακές ικανότητες απορρόφησης προσδιορίστηκαν μέσω της εξίσωσης 2.5.2.1 και ακολούθως μετατράπηκαν σε ειδικές ενεργειακές ικανότητες απορρόφησης με τη χρήση της εξίσωσης 2.5.2.2.

$$W = \int_0^{\varepsilon} \sigma(\varepsilon)\ d\varepsilon \tag{2.5.2.1}$$

$$Ws = \frac{\int_0^{\varepsilon} \sigma(\varepsilon)\, d\varepsilon}{\Delta p \rho s} \tag{2.5.2.2}$$

- W = Ικανότητα απορρόφησης ενέργειας
- W_s = Ειδική ικανότητα απορρόφησης ενέργειας
- Δ_P = Σχετική πυκνότητα δομής
- ρ_s = Πυκνότητα του συμπαγούς υλικού

Για την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας της συμβατική δομής CAJS βρέθηκε να είναι η χαμηλότερη, όπως φαίνεται και στον πίνακα 2.4.2.4, δηλαδή 0.348 x 10^4 j/m^3. Η MSS παρουσίασε την μέγιστη τιμή, δηλαδή 1,05 × 10^4 J/m^3 (200% υψηλότερη από τη συμβατική δομή), ακολουθούμενη από την NAJS με τιμή 0,436 × 10^4 J/m^3 (25,3% υψηλότερη από τη συμβατική δομή) και τη δεύτερη NAJS με 0,426 × 10^4 J/m^3 (22,4% υψηλότερη από τη συμβατική δομή).

Επομένως, οι τροποποιήσεις των κυψελοειδών στοιχείων που πραγματοποιήθηκαν σε αυτήν την έρευνα κρίθηκαν αποδοτικές. Ως αποτέλεσμα, όλες οι νέες δομές παρουσίασαν αυξημένη ενδοεπίπεδη ακαμψία και ικανότητα απορρόφησης ενέργειας σε σύγκριση με τη συμβατική δομή.

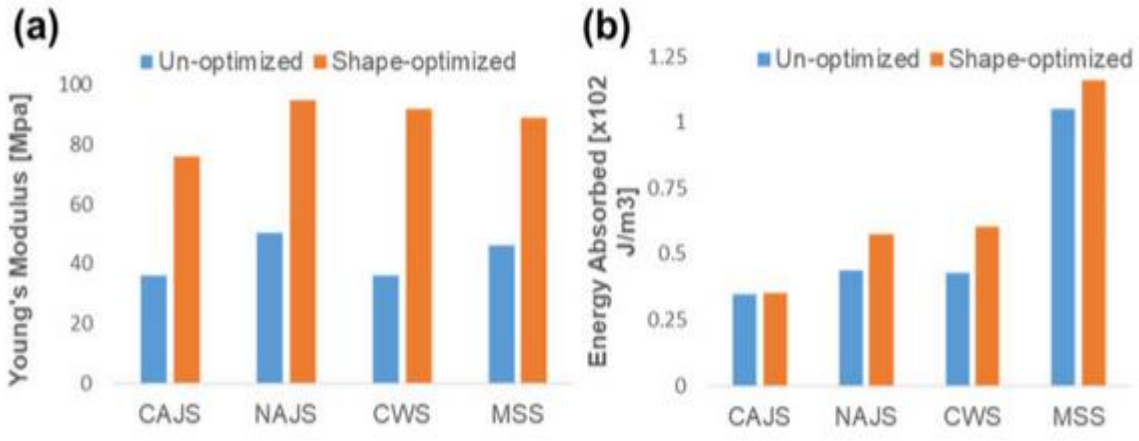
Για την περαιτέρω βελτίωση της μηχανικής συμπεριφοράς των αυξητικών δομών εφαρμόστηκε shape Optimization μέσω του Abaqus Topology Optimization Module (ATOM). Η διαδικασία είχε στόχο την βελτίωση της ακαμψίας και της ικανότητας απορρόφησης ενέργειας των δομών, χωρίς αύξηση της μάζας τους, μέσω τροποποίησης του πάχους των δομικών στοιχείων. Το συγκεκριμένο module του Abaqus/CAE παρέχει τρεις μεθόδους βελτιστοποίησης: τοπολογική βελτιστοποίηση, βελτιστοποίηση διαστάσεων και βελτιστοποίηση σχήματος. Στην παρούσα μελέτη, επιλέχθηκε η τελευταία μέθοδος.

Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε με στατικά θλιπτικά φορτία, και οι κόμβοι μετακινήθηκαν βάσει των τοπικών συγκεντρώσεων τάσεων. Δηλαδή σε περιοχές υψηλής τάσης, οι κόμβοι μετακινήθηκαν προς τα έξω, αυξάνοντας τοπικά το πάχος των στοιχείων ενώ σε περιοχές χαμηλής τάσης, οι κόμβοι μετακινήθηκαν προς τα μέσα μειώνοντας το πάχος και εξοικονομώντας υλικό. Η συνολική μάζα παρέμεινε σχεδόν σταθερή, ενώ η κατανομή υλικού έγινε πιο αποδοτική.

Τα αποτελέσματα ήταν ότι όλες οι δομές εμφάνισαν αυξημένο μέτρο ελαστικότητας και υψηλότερη απορρόφηση ενέργειας. Η Non-Axial Joints Structure (NAJS) είχε το μεγαλύτερο μετρό ελαστικότητας 95MPa με βελτίωση 89% σε σχέση με την αρχική μορφή της. Η Mixed Star Structure (MSS) διατήρησε την καλύτερη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας, παρουσιάζοντας αύξηση 9.5%. Συνολικά η βελτιστοποίηση της τοπολογίας συνέλαβε στη βελτίωση της μηχανικής απόδοσης όλων των δομών όπως φαίνεται και στον πίνακα 2.5.2.5 αλλά και στο (σχήμα 2.5.2.7) από το σχεδιάγραμμα.

	Young 's Modulus (MPa)		**Energy Absorption capacity (x10^4 J/m^3)**		**Specific Energy Absorption capacity (J/kg)**	
	Un-optimized	Shape-optimized	Un-optimized	Shape-optimized	Un-optimized	Shape-optimized
CAJS	36.01	76	0.348	0.352	11.04	11.17
NAJS	50.3	95	0.44	0.58	13.64	17.99
CWS	36.15	92	0.43	0.60	5.85	8.16
MSS	46.5	89	1.05	1.15	23.25	25.47

Πίνακας 2.5.2.5 *Σύγκριση των μηχανικών ιδιοτήτων των μη βελτιωμένων και βελτιωμένων δομών.*



Σχήμα 2.5.2.7 *Σύγκριση μη βελτιστοποιημένων και βελτιστοποιημένων σχημάτων αυξητικών δομών: (α) Μονάδα Young, και (β) Ικανότητα απορρόφησης ενέργειας.*

Επίσης διαπιστώθηκε ότι η νέα δομή MSS παρουσίασε την καλύτερη απόδοση υπό μονοαξονική φόρτιση συμπίεσης σε σύγκριση με τις άλλες δομές. Ακόμα έγινε σύγκριση των μηχανικών ιδιοτήτων των βελτιστοποιημένων αυξητικών δομών που αναπτύχθηκαν με άλλες γνωστές δομές από τη βιβλιογραφία όπως honeycomb, Re-entrant, auxetic strut, AH-V1 και AH-V2. Παρατηρήθηκε ότι το μέτρο ελαστικότητας Young όλων των δομών της παρούσας έρευνας ήταν σημαντικά υψηλότερο σε σύγκριση με τις δομές αυτές. Η ειδική ικανότητα απορρόφησης ενέργεια των προτεινόμενων δομών ήταν σχεδόν ίδια με εκείνη των δομών της βιβλιογραφίας, εκτός από την MSS.

Η MSS παρουσίασε σημαντικά υψηλότερη ειδική ικανότητα απορρόφησης ενέργειας από όλες τις άλλες δομές, υπογραμμίζοντας την αποτελεσματικότητα του σχεδιασμού της και καθιστώντας τη μια εξαιρετική επιλογή για εφαρμογές που απαιτούν υψηλή ακαμψία και ικανότητα απορρόφησης ενέργειας.

Τέλος οι αυξητικές δομές που προέκυψαν μέσω της βελτιστοποίησης σχήματος στο Abaqus μπορούν να κατασκευαστούν με τη μέθοδο FDM 3D εκτύπωσης με ικανοποιητική ακρίβεια. Ωστόσο, αυτή η διαπίστωση ισχύει στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης, καθώς οι εκτυπωμένες δομές διέθεταν απλή γεωμετρία και δεν παρουσίασαν σημαντικά ελαττώματα που θα μπορούσαν να επηρεάσουν τη μηχανική τους συμπεριφορά. Αντίθετα, όταν η βελτιστοποίηση σχήματος εφαρμόζεται σε πιο πολύπλοκες δομές, η διαδικασία FDM 3D εκτύπωσης ενδέχεται να οδηγήσει σε πορώδη υφή ή άλλες ατέλειες. Σε αυτές τις περιπτώσεις, για την επίτευξη υψηλής ακρίβειας απαιτείται είτε προηγμένος εξοπλισμός FDM είτε τεχνικές μετ 'επεξεργασίας.

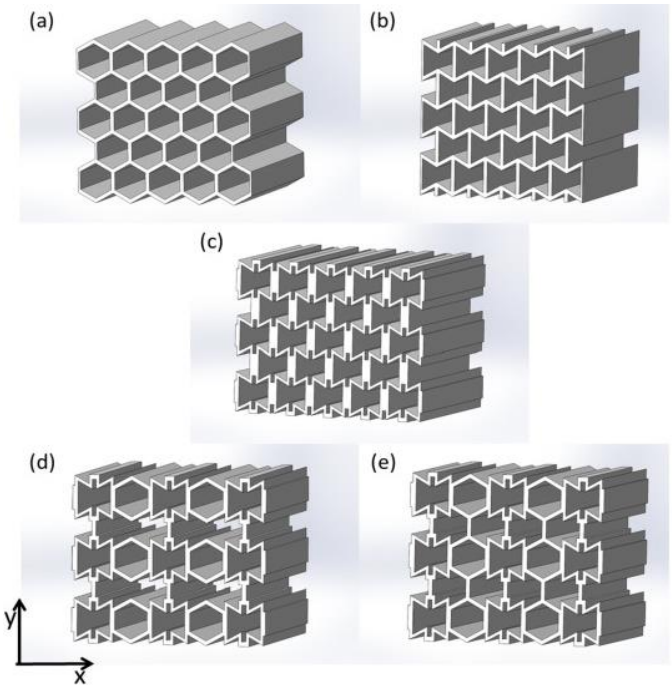
2.5.3 Δομές honeycomb, Re-entrant auxetic, auxetic-strut, AH-V1, AH-V2

Το ερευνητικό άρθρο από τους Ingrole κ.ά. [57] εξετάζει τον σχεδιασμό και την μοντελοποίηση δομών honeycomb με αυξητικές και υβριδικές δομές για την βελτίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών. Οι δομές honeycomb είναι γνωστές για την χαμηλή πυκνότητα τους και την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας από κρούση. Η μελέτη παρουσιάζει έναν καινοτόμο σχεδιασμό στηριγμάτων με διαιρεμένες κατακόρυφους δοκούς και δυο υβριδικά μοντέλα που συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα της κλασικής και αυξητικής δομής honeycomb.

Οι πέντε διαφορετικές δομές κυψελών είναι:

- Η συμβατική Honeycomb
- Re-entrant auxetic
- Auxetic-struts
- Auxetic -Honeycomb 1 (AH-V1)
- Auxetic -Honeycomb 2 (AH-V2)

Στο σχήμα 2.5.3.1 φαίνονται οι πέντε διαφορετικές δομές που μελετήθηκαν.



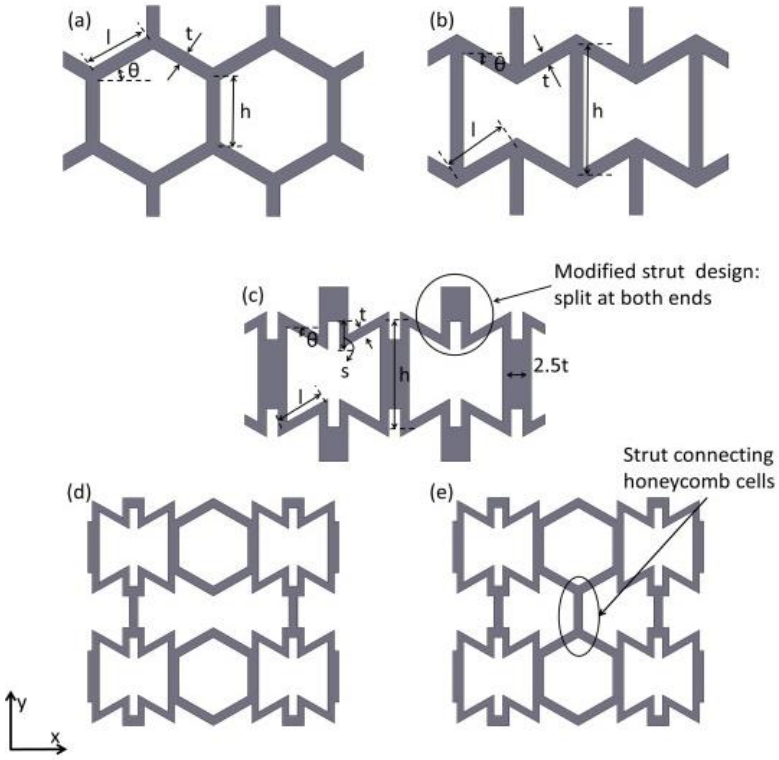
Σχήμα 2.5.3.1 *Δομές σχεδίασης κυττάρων: (a) honeycomb, (b) re-entrant auxetic, (c) auxetic-strut, (d) auxetic-honeycomb1 (AH-V1), and (e) auxetic-honeycomb2 (AH-V2).*

Η νέα auxetic-struts δομή είναι μια βελτιωμένη έκδοση, με κατακόρυφες δοκούς που είναι παχύτερες 2,5 φορές στο κέντρο από τις δοκούς της Re-entrant δομής και διαχωρίζονται στις άκρες. Αυτή η τροποποίηση έχει στόχο την μείωση της συγκέντρωσης τοπικών τάσεων και την διανομή του φορτίου πιο ομοιόμορφα.

Οι υβριδικές δομές (AH-V1, AH-V2) συνδυάζουν συμβατικές και αυξητικές δομές, με την βασική διαφορά ότι στην AH-V1 οι honeycomb δομές συνδέονται μόνο με αυξητικές δομές ενώ στην AH-V2 υπάρχει επιπλέον κάθετη δοκός που συνδέει τις δομές honeycomb μεταξύ τους. Οι υβριδικές δομές βοηθούν στον έλεγχο του τρόπου κατάρρευσης και στη διαχείριση της κατανομής των φορτίων.

Η σχετική πυκνότητα καθορίζει την ακαμψία και την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας της δομής. Στην συμβατική Honeycomb με την αύξηση του πάχους τα τοιχώματά των δομών αντιστέκονται περισσότερο στην κάμψη και την κατάρρευση όμως μειώνεται η δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας. Στην Re-entrant δομή, η σχετική πυκνότητα είναι υψηλότερη από την συμβατική, ενώ στην auxetic-strut, η σχετική πυκνότητα είναι 60% υψηλότερη από την Honeycomb και 15% υψηλότερη από την Re-entrant. Οι υβριδικές δομές έχουν ενδιάμεσες τιμές και επιτρέπουν πιο ελεγχόμενη παραμόρφωση. Να αναφερθεί ότι οι σχετικές πυκνότητες των δομών υπολογίζονται μέσω μαθηματικών εξισώσεων, λαμβάνοντας υπόψη γεωμετρικές παραμέτρους όπως μήκος, γωνία και πάχος των δοκών και αναφέρονται αναλυτικά στο κεφάλαιο [2.2] του άρθρου.

Ο λόγος Poisson των κυψελοειδών δομών υπό μονοαξονική φόρτιση έχει προκύψει και επαληθευτεί από τους Gibson and Ashby για φόρτιση κατά y διεύθυνση. Οι εκτροπές των κυψελοειδών δοκών θεωρούνται ότι συμπεριφέρονται όπως οι απλές δοκοί του Euler. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η honeycomb έχει θετικό λόγο Poisson (1), η auxetic-strut δομή έχει ένα πιο ελεγχόμενο λόγο (-0.5378), που σημαίνει ότι παραμορφώνεται πιο ομοιόμορφα σε σχέση με την Re-entrant που έχει (-1), ενώ οι υβριδικές δομές επιτρέπουν την ρύθμιση του λόγου Poisson ανάλογα την διάταξη των κυψελών και των δοκών τους. Παρακάτω ακολουθεί το (σχήμα 2.5.3.2) των δομών και ο πίνακας 2.5.3.1 των παραμέτρων των βασικών κυψελών.



Σχήμα 2.5.3.2 *Δομές σχεδίασης κυττάρων: (a) honeycomb, (b) re-entrant auxetic, (c) auxetic-strut, (d) auxetic-honeycomb1 (AH-V1), and (e) auxetic-honeycomb2 (AH-V2).*

Design	h (mm)	I (mm)	t (mm)	Θ (^{0})	ρ^*/ρ_s	V_y^*
Honeycomb	5.20	5.20	1	30	0.2221	1
Re-entrant auxetic	10	5	1	-30	0.3079	-1
Auxetic-strut (s=2.45)	9.8	3.75	1	-30	0.3542	-0.5378

Πίνακας 2.5.3.1 *Σχεδιαστικές παράμετροι για τα βασικά κύτταρα μονάδας.*

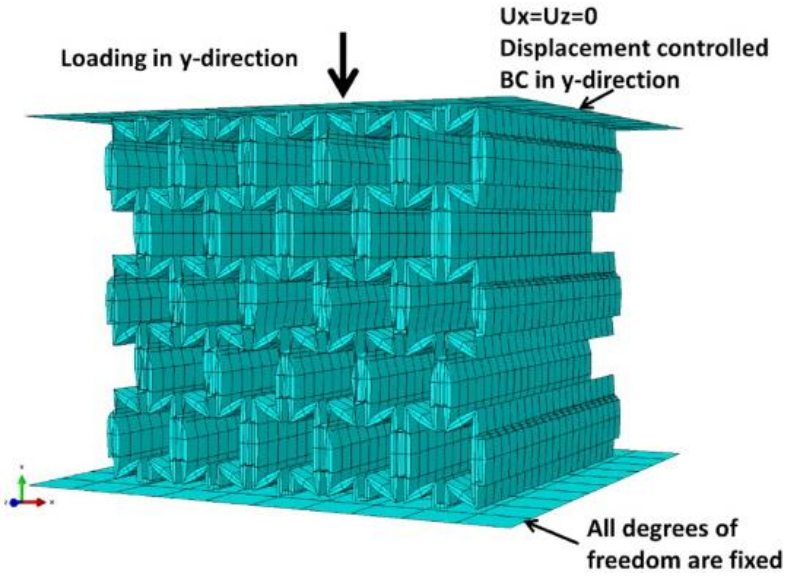
Στην συνέχεια τα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων δημιουργήθηκαν ως (shell elements) με τις διαστάσεις που αναφέρονται στον πίνακα 2.5.3.1, και το υλικό που χρησιμοποιήθηκε να είναι ABS. Οι μηχανικές ιδιότητες του πολυμερούς, αναφέρονται στο πίνακα 2.5.3.2.

Υλικό	Young's modulus E_s	Yield stress	Poisson's ration	Density ρ_s
ABS	2.2 GPa	31 MPa	0.35	1.05 g/cm^{33}

Πίνακας 2.5.3.2 *Μηχανικές ιδιότητες του υλικού ABS.*

Τα δείγματα των μοντέλων honeycomb, auxetic και auxetic-strut αποτελούνται από πέντε μονάδες κυψελών στην κατεύθυνση x και μονάδες στην κατεύθυνση y. Για το μοντέλο AH-V1, δυο μονάδες κυψελών τοποθετήθηκαν μεταξύ τριών μονάδων αυξητικών-δομών στην κατεύθυνση x και ολόκληρη η σειρά χρησιμοποιήθηκε τρείς φορές στην κατεύθυνση y. Το μοντέλο AH-V2 είναι παρόμοιο με το μοντέλο AH-V1, με την μονή διαφορά ότι στην κατεύθυνση y, όλες οι μονάδες συνδέονται μεταξύ τους. Το βάθος κάθε μοντέλου που δημιουργήθηκε ήταν στα 45mm.

Στην διαμόρφωση πλέγματος (Meshing), για την προσομοίωση χρησιμοποιήθηκαν SR4 πεπερασμένα στοιχεία με τετραεδρικό πλέγμα. Για να προσομοιωθεί η επιφανειακή θλίψη, τα μοντέλα τοποθετήθηκαν ανάμεσα σε δύο άκαμπτες πλάκες (rigid plates), με την κάτω πλάκα να παραμένει ακίνητη (για όλους τους βαθμούς ελευθερίας) ενώ στην πάνω πλάκα επιτράπηκε να κινηθεί μόνο στην κατεύθυνση y κατά 20 mm μετατόπιση, όπως φαίνεται και στο (σχήμα 2.5.3.3). Η αλληλεπίδραση των κυψελοειδών τοιχωμάτων προσομοιώθηκε με επαφή ως ALL WITH SELF με τανυστική συμπεριφορά και εφαρμόστηκε συντελεστής τριβής 0.2.



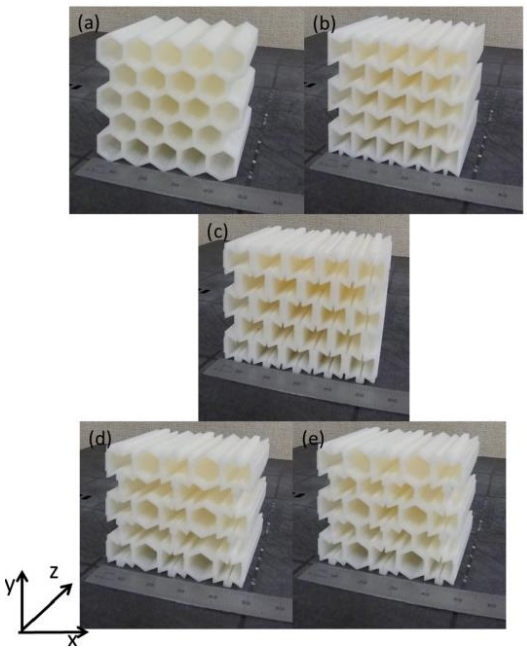
Σχήμα 2.5.3.3 *Συνθήκες ορίων που χρησιμοποιήθηκαν σε μοντέλα FEA για την αξιολόγηση των ιδιοτήτων εντός επιπέδου.*

Μετά την προσομοίωση αναλύθηκαν οι παραμορφώσεις των δομών κατά την φόρτιση, η συμπεριφορά των διαφορετικών δομών, καθώς και οι τάσεις – μηχανικές ιδιότητες που προέκυψαν. Τα αποτελέσματα από την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων δείχνουν παρόμοια παραμόρφωση των μονάδων κυψελών και για τις δύο βασικές δομές, κυψελοειδείς και αναδιπλούμενες αυξητικές, όπως έχουν βρεθεί στη βιβλιογραφία. Οι γραφικές παραστάσεις φόρτου και μετατόπισης χρησιμοποιήθηκαν για την δημιουργία γραφημάτων καταπόνησης - παραμόρφωσης (stress-strain).

Τα γραφήματα εμφανίζουν παρόμοιο μοτίβο με αυτό των κυψελών αλουμινίου που παρουσιάζουν οι Gibson και Ashby, δηλαδή η δομή αντέχει το φορτίο στην αρχική φάση και στην συνέχεια η τιμή της καταπόνησης πέφτει καθώς οι κυψέλες αρχίζουν να καταρρέουν. Μόλις οι κατεστραμμένες κυψέλες συμπιεστούν, η τιμή της καταπόνησης αυξάνεται ξανά και η δομή αρχίζει να αναλαμβάνει το φορτίο, ακολουθούμενη από παρόμοιες πτώσεις και αυξήσεις της τιμής της καταπόνησης έως να συμπιεστεί ολόκληρη η δομή.

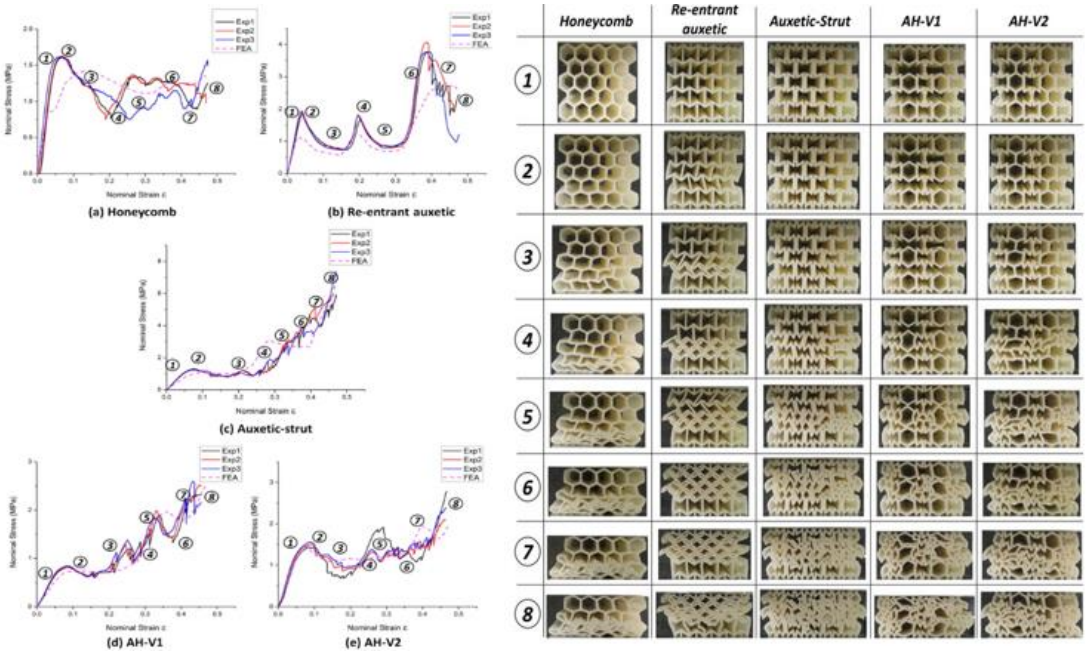
Για της πειραματικές δοκιμές οι μονάδες κυψελών κάθε μοντέλου σχεδιάστηκαν στο SolidWorks Pro 2015 και συνέχεια δημιουργήθηκαν τρία δείγματα για κάθε σχέδιο χρησιμοποιώντας προσθετική κατασκευή με τη μέθοδο FDM. Ο εκτυπωτής που χρησιμοποιήθηκε ήταν ο Dimension bst 1200es, με υλικό ABS plus-P430 που παρέχεται από την εταιρία Stratasys.

Το ύψος των στρώσεων (Layer height) που δόθηκε ήταν 0.254 mm, η πλήρωση (Infill) επιλέχθηκε ως solid, και το πάχος των τοιχωμάτων των κυψελών για όλα τα δείγματα είναι 1 mm. Επίσης η κατεύθυνση εκτύπωσης είναι στον άξονα z ώστε να αποφευχθούν υποστηρίξεις στη δομή. Μετά την εκτύπωση, τα δείγματα μετρήθηκαν με μικροσκοπικό λογισμικό ανάλυσης εικόνας για να διασφαλιστεί η ακρίβεια των διαστάσεων τους. Υπήρχαν μικρές αποκλείσεις στο πάχος των τοιχωμάτων, αλλά η μέση τιμή ήταν κοντά στις σχεδιάστηκες προδιαγραφές. τα εκτυπωμένα δείγματα παρουσιάζονται στο (σχήμα 2.5.3.4).



Σχήμα 2.5.3.4 *Εκτυπωμένες Δομές κυττάρων: (a) honeycomb, (b) re-entrant auxetic, (c) auxetic-strut, (d) auxetic-honeycomb1 (AH-V1), and (e) auxetic-honeycomb2 (AH-V2).*

Τα εκτυπωμένα δείγματα υποβλήθηκαν σε δοκιμές αξονικής θλίψης για την αξιολόγηση των μηχανικών τους ιδιοτήτων. Η μηχανή δοκιμών που χρησιμοποιήθηκε ονομάζεται 250 kN MTS και η ταχύτητα φόρτισης ήταν 2 mm/min έως 50% παραμόρφωση. Οι τιμές δύναμης-μετατόπισης καταγράφηκαν και χρησιμοποιήθηκαν για περαιτέρω ανάλυση. Για κάθε τύπο δομής δοκιμάστηκαν τρεις διαφορετικές εκτυπωμένες μονάδες ώστε να διασφαλιστεί η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων.



Σχήμα 2.5.3.5 *Α) Διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης για: (a) honeycomb, (b) re-entrant auxetic, (c) auxetic-strut, (d) auxetic-honeycomb1 (AH-V1), and (e) auxetic-honeycomb2 (AH-V2). Και Β) Ακολουθία παραμορφωμένων διαμορφώσεων κατά τη διάρκεια της παραμόρφωσης και αποτυχίας των δειγμάτων.*

Η συμπεριφορά και των πέντε μοντέλων καταγράφηκε όπως φαίνεται στο (σχήμα 2.5.3.5). Αρχικά όλες οι δομές παρουσίασαν γραμμική ελαστική παραμόρφωση, όπου οι κυψέλες παραμορφώνονταν ομοιόμορφα, όταν

η δομή έφτανε σε ένα κρίσιμο όριο παραμόρφωσης, ξεκινούσε η κατάρρευση των κυψελών, οδηγώντας σε πτώσεις της τάσης. Ο τρόπος με τον οποίο καταρρέουν οι κυψέλες εξαρτάται από την ιδιότητα του υλικό των τοιχωμάτων τους. Μόλις τα αντίθετα τοιχώματα των κυψελών έρχονται σε επαφή, η κατάρρευση της κυψέλη ολοκληρώνεται.

Με την σύγκριση και των πέντε δομών, παρατηρείται ότι όλες παρουσιάζουν ελαστική-πλαστική συμπεριφορά κατάρρευσης. Στα διαγράμματα του (σχήματος 2.5.3.5) φαίνεται ότι υπάρχει μια αρχική γραμμική περιοχή καταπόνησης-παραμόρφωσης, οπού οι κυψέλες παραμορφώνονται ομοιόμορφα. Η τιμή της καταπόνησης μειώνεται καθώς οι πρώτες σειρές κυψελών καταρρέουν, μετά την οποία η τιμή της καταπόνησης αυξάνεται ξανά λόγω της πυκνότητας των κατεστραμμένων κυψελών. Η κυκλική συμπεριφορά, όπου παρατηρείται αύξηση και μείωση της καταπόνησης, συνεχίζεται μέχρι να καταρρεύσουν όλες οι σειρές και να ολοκληρωθεί η πλήρης πυκνότητα.

Τα δείγματα auxetic-strut παρουσιάζουν μεγάλη περιοχή plateau μετά την πρώτη κορυφή καταπόνησης, καθώς τα κύτταρα τους παραμορφώνονται ομοιόμορφα και η καταπόνηση κατανέμεται ισομερώς. Στις honeycomb και re-entrant auxetic δομές, η συγκέντρωση καταπόνησης εμφανίζεται μόνο σε μία σειρά, προκαλώντας απότομες αυξομειώσεις στην καταπόνηση. Στα δείγματα auxetic-strut και AH-V1 ο λόγος που δεν υπάρχει απότομη πτώση της καταπόνησης καθώς οι δομές καταρρέουν εντός τους και αντέχουν το φορτίο λόγω της μεγαλύτερης τοπικής πυκνότητας.

Τα μηχανικά χαρακτηριστικά καθώς και τα χαρακτηριστικά απορρόφησης ενέργειας παρουσιάζονται στο πίνακα 2.4.3.3 παρακάτω. Παρατηρείται ότι η auxetic-strut δομή αντέχει το μεγαλύτερο φορτίο υπό συμπίεση (~6–7 MPa), ξεπερνώντας την ανακατευθυνόμενη auxetic (~3.7–4 MPa) και τις υβριδικές κυψελωτές δομές (~2.1–2.7 MPa). Ο δείκτης Young's modulus είναι υψηλότερος στις ανακατευθυνόμενες auxetic (~54 MPa) και στις κυψελωτές δομές (~36 MPa), ενώ το AH-V1 έχει τη χαμηλότερη τιμή (~14 MPa). Επίσης Δεν υπάρχει σημαντική διαφορά μεταξύ των auxetic-strut και AH-V2 (~20–24 MPa). Ακόμα Οι υβριδικές δομές (AH-V1 & AH-V2) έχουν χαμηλότερες μηχανικές ιδιότητες, αλλά επιτρέπουν προσαρμογή και έλεγχο της κατάρρευσης των κυψελών.

Design	Compressive strength (MPa		Young's modulus (MPa)		Energy absorbed ($\times 10^4$J/m^3)		Specific energy absorbed (J/kg)	
	FEA	Exp	FEA	Exp	FEA	Exp	FEA	Exp
Honeycomb	1.429	1.618	32.598	35.828	0.554	0.551	23.801	23.178
Re-entrant auxetic	2.809	3.875	41.727	52.825	0.586	0.715	18.148	22.116
Auxetic-strut	7.374	6.427	15.260	20.453	1.013	0.935	27.255	25.145
AH-V1	2.509	2.479	10.779	13.888	0.540	0.518	17.729	16.986
AH-V2	1.975	2.426	23.49	25.710	0.598	0.583	18.368	17.900

Πίνακας 2.5.3.3 *Σύγκριση των μηχανικών ιδιοτήτων που προέκυψαν πειραματικά και μέσω FEA.*

Η συνολική ενέργεια απορρόφησης υπολογίστηκε με την ολοκλήρωση των ονομαστικών καμπυλών τάσης-παραμόρφωσης και δίνεται από την εξίσωση 2.5.3.1 και η ειδική ενέργεια απορρόφησης που εκφράζει την σχέση με τη μάζα του υλικού της δομής από την εξίσωση 2.5.3.2.

$$W = \int_0^{\varepsilon} \sigma(\varepsilon)\ d\varepsilon \tag{2.5.3.1}$$

$$Ws = \frac{\int_0^{\varepsilon} \sigma(\varepsilon)\, d\varepsilon}{\Delta p \rho s} \tag{2.5.3.2}$$

Η auxetic-strut θα παρουσίαζε εξαιρετική ικανότητα απορρόφησης ενέργειας σε σύγκριση με τις άλλες δομές, αυτό σχετίζεται κυρίως με τον μηχανισμό παραμόρφωσης της κυψελωτής δομής, ενώ και η σχετική πυκνότητα των κυψελών παίζει σημαντικό ρόλο στην απορρόφηση ενέργειας. Παρακάτω παρουσιάζονται οι πίνακες 2.5.3.4 και 2.5.3.5 (οι τιμές που αναφέρονται είναι από το πειραματικό κομμάτι θλίψης), με τις διαφορές στην απορρόφηση ενέργειας και ειδικής ενέργεια κάθε δομής.

Δομή	Απορρόφηση Ενέργειας ($\times 10^4$ J/m^3)	Διαφορά (%) σε σχέση με την honeycomb
Honeycomb	0.55-0.57	-
Re-entrant auxetic	0.69-0.73	+30%
Auxetic-strut	0.92-0.95	+70%
AH-V1	0.50-0.56	-
AH-V2	0.56-0.60	-

Πίνακας 2.5.3.4. *Σύγκριση μεταξύ των μονάδων για την Συνολικής Απορρόφησης Ενέργειας*

Δομή	Ειδική Απορρόφηση Ενέργειας (J/Kg)	Διαφορά (%) σε σχέση με την honeycomb
Honeycomb	23.3 - 23.6	-
Re-entrant auxetic	21.5 - 22.5	-4% έως -8%
Auxetic-strut	24.9 - 25.3	+8%
AH-V1	16.5 - 17.4	-
AH-V2	17.2 - 18.4	-

Πίνακας 2.5.3.5 *Σύγκριση μεταξύ των μονάδων για την Ειδική Απορρόφησης Ενέργειας.*

Σημαντικό ρόλο παίζει ο τρόπος που καταρρέει μια δομή στην αντοχή της και στη ικανότητα της να απορροφά ενέργεια. Όταν ένα φορτίο (P) εφαρμόζεται σε κυψελωτή δομή προς την κατεύθυνση y, τα τοιχώματα των κυψελών που είναι παράλληλα προς την κατεύθυνση του φορτίου συμπεριφέρονται όπως μια στήλη φορτωμένη στα άκρα της. Όταν το φορτίο στη στήλη υπερβεί το κρίσιμο φορτίο λογισμού κατά Euler, η στήλη υποβάλλεται σε λογισμό.

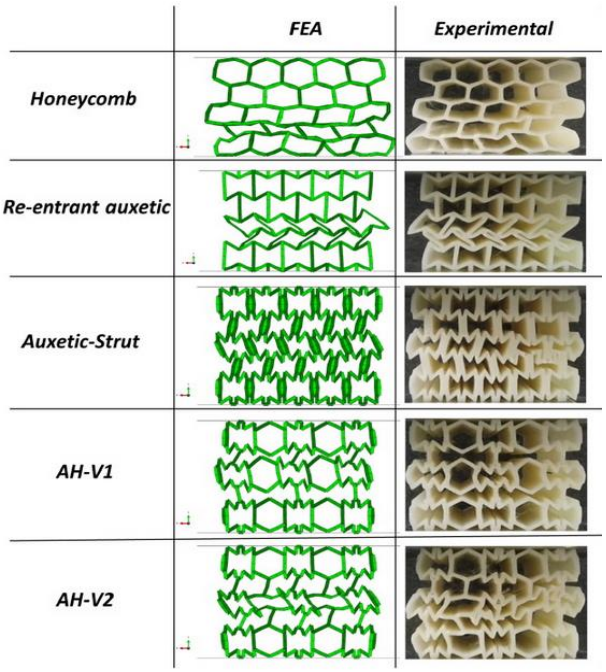
Στην Honeycomb δομή, όταν ασκείται φορτίο θλίψης, τα κατακόρυφα τοιχώματα λειτουργούν ως στήλες υπό αξονική φόρτιση. Οι κυψέλες καταρρέουν κυρίως μέσω ελαστικής κάμψης και τοπικής αστοχίας, λόγω της συγκέντρωσης καταπόνησης στις γωνίες τους. Επίσης παρατηρείται ασύμμετρη κατάρρευση, αφού ορισμένες κυψέλες, καταρρέουν πριν από άλλες, οδηγώντας σε ανομοιόμορφη μεταφορά φορτίου. Με αυτό τον τρόπο η δομή απορροφά λιγότερη ενέργεια, καθώς η κάμψη των κυψελών συμβαίνει πρόωρα και μη ελεγχόμενα.

Στις Re-entrant auxetic και auxetic-strut δομές, η κατάρρευση των κελιών ήταν συμμετρική, με ομοιόμορφη παραμόρφωση. Με την αύξηση της τάσης το στρώμα κυψελών δίπλα στην τοπική ζώνη (εκεί που αρχίζουν οι πρώτες κυψέλες να καταρρέουν) αρχίζει επίσης να καταρρέει και η παραμόρφωση επεκτείνεται σταδιακά σε όλη την δομή. Όταν οι πρώτες σειρές κατεστραμμένων κυψελών έρχονται σε επαφή μεταξύ τους, η δομή γίνεται πιο συμπαγής και απαιτείται μεγαλύτερη δύναμη για να συνεχιστεί η κατάρρευση δημιουργώντας μια επαναλαμβανόμενη κυκλική συμπεριφορά.

Η παραμόρφωση των δομών AH-V1 και AH-V2 ήταν διαφορετική από τις άλλες τρεις δομές. Στην AH-V1, όταν εφαρμόστηκε το φορτίο στην κατεύθυνση y, τα auxetic-strut κελιά παραμορφώθηκαν σύμφωνα με τη διεύθυνση φόρτισης, αλλά τα κυψελωτά κελιά παραμορφώθηκαν σαν να φορτίζονταν στην κατεύθυνση x.

Όπως φαίνεται στο (σχήμα 2.5.3.6), τα auxetic-strut κελιά συμπιέζονται, ενώ τα κυψελωτά κελιά επιμηκύνονται στην κατεύθυνση y. Επειδή τα κυψελωτά κελιά δεν ήταν συνδεδεμένα μεταξύ τους, ήταν τα τελευταία που παραμορφώθηκαν πλήρως. Η κατάρρευση των κελιών δεν έγινε σε σειρές, όπως στις άλλες δομές, αλλά σε στήλες. Όλες οι στήλες των auxetic-strut κελιών κατέρρευσαν πρώτες και έπειτα τα κυψελωτά κελιά.

Η παραμόρφωση της δομής AH-V2 ήταν παρόμοια με εκείνη των βασικών μονάδων κελιών. Όταν εφαρμόζεται το φορτίο, τα κυψελωτά κελιά προσπαθούν να καταρρεύσουν πλευρικά, ενώ τα auxetic-strut κελιά καταρρέουν εντός της ίδιας της δομής τους. Αυτή η συμπεριφορά αποτρέπει και τους δύο τύπους κελιών από το να καταρρεύσουν εύκολα. Οι οξείες και μικρές άκρες των διαχωρισμένων άκρων που υπάρχουν στη δομή των auxetic-strut κελιών είναι οι πρώτες που καταρρέουν. Όταν το auxetic-strut κελί καταρρέει, δυσχεραίνει επίσης την πλευρική παραμόρφωση του κυψελωτού κελιού. Μόλις ξεκινήσει η παραμόρφωση, οι σειρές των κελιών καταρρέουν με παρόμοιο τρόπο με τα πρωτεύοντα μοντέλα μονάδων κελιών. Αυτοί οι μοναδικοί τρόποι παραμόρφωσης επιτρέπουν την τροποποίηση των ιδιοτήτων της δομής και τον έλεγχο του μηχανισμού αποτυχίας της συνολικής κατασκευής.



Σχήμα 2.5.3.6 *Παραμορφωμένο σχήμα των δομών υπό συμπίεση από FEA και πειραματικά.*

Τα συμπεράσματα από αυτή την έρευνα μεταξύ την σύγκριση των δομών έδειξαν ότι η auxetic-strut δομή παρουσίασε την καλύτερη μηχανική συμπεριφορά υπό θλίψη, με αντοχή 65% υψηλότερη από την re-entrant auxetic δομή και 300% υψηλότερη από τη συμβατική honeycomb. Επιπλέον, η απορρόφηση ενέργειας της auxetic-strut ήταν 70% μεγαλύτερη από τη honeycomb και 30% μεγαλύτερη από την re-entrant auxetic. Η ειδική απορρόφηση ενέργειας της auxetic-strut δομής ήταν περίπου 13% μεγαλύτερη από αυτήν των παραδοσιακών δομών. Ωστόσο, οι δομές re-entrant auxetic και honeycomb εμφάνισαν υψηλότερο μέτρο ελαστικότητας (Young's modulus) σε σύγκριση με τη δομή auxetic-strut.

Οι υβριδικές δομές παρουσίασαν ένα ιδιαίτερο τρόπο παραμόρφωσης, βοηθώντας στην κατανόηση στον τρόπο κατάρρευσης όταν υπάρχουν διαφορετικές δομές μέσα σε μια μονάδα. Η υβριδική δομή αυξητικών δοκών και honeycomb 1 (AH-V1) ήταν η μοναδική στην οποία οι κυψέλες κατέρρευσαν πρώτα σε κατακόρυφες στήλες, αφήνοντας τις honeycomb κυψέλες να καταρρεύσουν αργότερα. Αυτή η ιδιότητα μπορεί να αξιοποιηθεί σε διάφορες εφαρμογές όπου απαιτείται έλεγχος της τοποθεσίας κατάρρευσης των κυψελών. Επιπλέον, οι honeycomb κυψέλες μπορούν να γεμίσουν με διαφορετικά υλικά, έτσι ώστε μόλις οι αυξητικές δοκοί καταρρεύσουν και αρχίσει η κατάρρευση των honeycomb κυψελών, το υλικό στο εσωτερικό τους να ενισχύσει τη συνολική δομή.

Κεφάλαιο 3: Εφαρμογές Αυξητικών Δομών

3.1 Γενικές Εφαρμογές

Οι ιδιότητες των αυξητικών δομών, όπως αναφέρθηκαν και στο παραπάνω κεφάλαιο καθίστανται ιδανικές για καινοτόμες εφαρμογές σε διάφορους τομείς της μηχανικής, αλλά και σε προϊόντα καθημερινής χρήσης. Λόγω της συμπεριφοράς τους, βρίσκουν εφαρμογή σε συστήματα απορρόφησης ενέργειας, ιδιαίτερα ως προστατευτικά σε διάφορα πεδία. Χρησιμοποιούνται για παράδειγμα στην αυτοκινητοβιομηχανία σε εφαρμογές όπως προφυλακτήρες και δομές πρόσκρουσης αυτοκινήτου, ενισχύοντας την μηχανική αντοχή και μειώνοντας την μεταφορά φορτίου στους επιβάτες.

Ένας ακόμη βασικός τομέας εφαρμογής είναι ο εξοπλισμός προστασίας, όπως για παράδειγμα τα κράνη, μέσω ενός σχεδιασμού που ενσωματώνει αυξητικές δομές ή με την προσθήκη αυξητικών αφρών με αποτέλεσμα την σημαντική μείωση της επιτάχυνσης που ασκείται στο κεφάλι του χρήστη σε περίπτωση πρόσκρουσης. Επιπλέον, σε είδη προστασίας αθλητισμού ή σε στρατιωτικές εφαρμογές, όπως επιγονατίδες, θώρακες, ειδικές στολές οι οποίες προσαρμόζονται στο σώμα κατά την κίνηση, διατηρώντας ταυτόχρονα την ανθεκτικότητα και την εργονομία.

Αντίστοιχα, άλλος ένας ενδιαφέρον τομέας εφαρμογής είναι ο σχεδιασμός σόλων υποδημάτων. Η ενσωμάτωση αυξητικών γεωμετριών στη σόλα επιτρέπει τη δυναμική προσαρμογή της σε μεταβαλλόμενα φορτία και πιέσεις, προσφέροντας βελτιωμένη απορρόφηση κραδασμών και προσαρμογή στο πέλμα του χρήστη. Αξιοσημείωτο είναι επίσης το γεγονός ότι, λόγω της δυνατότητας ελεγχόμενης διαπερατότητας και συμπίεσης/διαστολής, τα υλικά αυτά βρίσκουν εφαρμογή στον τομέα της ένδυσης υψηλών απαιτήσεων, όπως έξυπνα υφάσματα, ιατρικά ρούχα πίεσης και ειδικές στολές για συγκεκριμένες εφαρμογές προσφέροντας ρύθμιση πίεσης και βελτιωμένη άνεση.

Στην συνέχεια του κεφαλαίου, θα παρουσιαστεί και θα αναλυθεί μια σειρά από ερευνητικά άρθρα που εξετάζουν διαφορετικές εφαρμογές αυξητικών δομών στον τομέα της προστασίας αλλά και άλλους τομείς. Η επιλογή των άρθρων στοχεύει στην ανάδειξη της ευελιξίας των δομών, στην δυνατότητα προσαρμογής σε διαφορετικές εφαρμογές και τέλος στην ανάδειξη των πλεονεκτημάτων και των βελτιώσεων που προσφέρουν σε κάθε εφαρμογή.

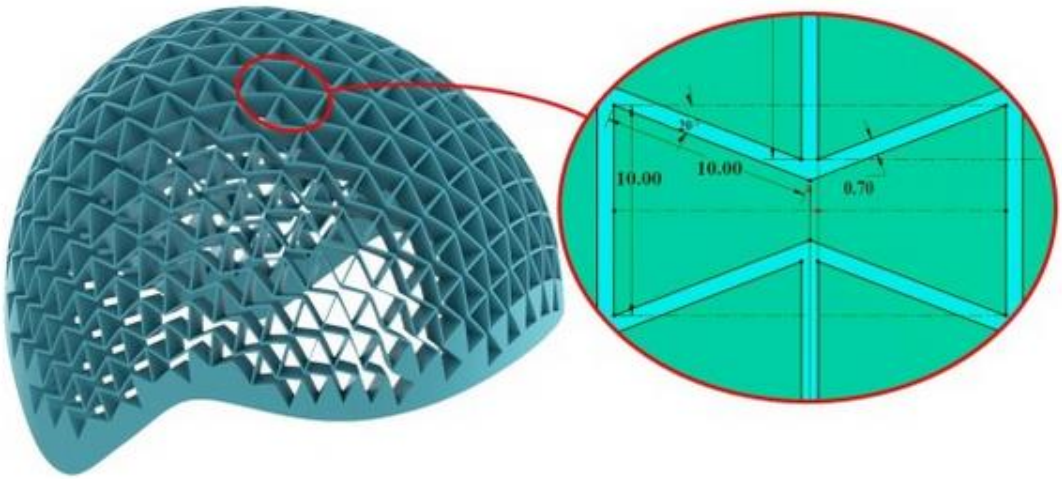
3.1.1 Κράνος ποδηλάτου

Τα κράνη αποτελούν βασικό εξοπλισμό ασφαλείας για ποδηλάτες και αθλητές, καθώς έχουν σχεδιαστεί για να προστατεύουν το κεφάλι από σοβαρούς τραυματισμούς σε περίπτωση σύγκρουσης ή πτώσης. Η αποτελεσματικότητά τους βασίζεται κυρίως στην ικανότητά τους να απορροφούν και να διαχέουν την κινητική ενέργεια μειώνοντας τον κίνδυνο κρανίο-εγκεφαλικών κακώσεων. Η έρευνα των Zamani κ.ά. [58] παρουσιάζει τον σχεδιασμό, τη βελτιστοποίηση και την κατασκευή ενός καινοτόμου κράνους ποδηλάτου χρησιμοποιώντας αυξητική δομή κατασκευασμένο από θερμοπλαστικό πολυουρεθάνιο (TPU) για την εσωτερική επένδυση και πολυαιθυλένιο (PETG) για το εξωτερικό κέλυφος.

Ο στόχος του σχεδιασμού είναι να αναπτυχθεί μια επένδυση κράνους βασισμένη σε αναδιπλούμενη (re-entrant) αυξητική δομή, ώστε να βελτιστοποιηθεί η απορρόφηση ενέργειας, χωρίς να αλλάξουν οι εξωτερικές διαστάσεις του κράνους σε σχέση με τα παραδοσιακά μοντέλα. Για το σχεδιασμό χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό SolidWorks, δημιουργώντας επαναλαμβανόμενα πρότυπα κυψελοειδούς γεωμετρίας 2d που δημιουργούν την τελική 3d δομή όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.1.1.1.

Χαρακτηριστικά γεωμετρίας κυψελών:

- Ύψος -Μήκος κυψέλης: 10mm
- Γωνία κεκλιμένων τοιχωμάτων: 20^{o}
- Πάχος τοιχώματος: 0,7 mm



Σχήμα 3.1.1.1 *Αρχικός σχεδιασμός της 2d re-entrant και ο αντίστοιχος 3d επενδυτής.*

Στην συνέχεια για την σωστή μοντελοποίηση του υλικού επένδυσης (TPU), πραγματοποιήθηκαν πειράματα συμπίεσης σε 3d εκτυπωμένα δοκίμια σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D695-15. Τα πειραματικά δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν για να καθοριστούν οι παράμετροι του hyper foam υλικού στο λογισμικό προσομοίωσης Abaqus.

Για την προσομοίωση της πρόσκρουσης δημιουργήθηκε πλήρες αριθμητικό μοντέλο που περιλάμβανε το κράνος, την επένδυση και ένα τεχνητό κεφάλι (head form) ως άκαμπτο σώμα με μάζα και ιδιότητες σύμφωνα με το πρότυπο BS EN 1078. Επιπλέον η ανάλυση πραγματοποιήθηκε με ταχύτητα 5,4 m/s όπως απαιτείται από το πρότυπο EN 1078. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το αριθμητικό μοντέλο αναπαριστά με ακρίβεια τη μηχανική συμπεριφορά της επένδυσης, η κατανομή των τάσεων επικεντρώθηκε στις περιοχές σύγκρουσης, επαληθεύοντας ότι η επένδυσης λειτουργεί ως ενεργειακός αποσβεστήρας και οι παραμορφώσεις της δομής παρέμειναν εντός ασφαλών ορίων (μέγιστη παραμόρφωση μικρότερη από 45%).

Επίσης, για την βελτιστοποίηση της γεωμετρίας της δομής χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος σχεδίασης πειραμάτων Taguchi (Taguchi Design of Experiments – DOE). Πρόκειται για μία στατική μέθοδο που επιτρέπει την μείωση του αριθμού απαιτούμενων δοκιμών, την ανάλυση της επίδρασης των διάφορων παραμέτρων σχεδίασης και του βέλτιστου συνδυασμού παραμέτρων για ελάχιστη επιτάχυνση. Οι παράμετροι που εξετάζονται για τη γεωμετρία της κυψέλης της επένδυσης είναι το πάχος τοιχώματος, το μήκος της κυψέλης και η γωνία τοιχώματος, με κάθε παράμετρο να εξετάζεται σε 3 επίπεδα τιμών, και έτσι να δημιουργούνται 9 σενάρια σχεδίασης που αναλύονται μέσω προσομοιώσεων πρόσκρουσης σε δύο επιφάνειες (επίπεδο αμόνι, κεκλιμένο αμόνι).

Κάθε συνδυασμός γεωμετρίας αξιολογήθηκε ως προς τη μέγιστη επιβράδυνση που προκαλεί στο τεχνητό κεφάλι, με τα αποτελέσματα να σημειώνουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των διαφορετικών δομών. Ο καλύτερος συνδυασμός γεωμετρίας απέδωσε 246 g επιβράδυνση στο επίπεδο αμόνι και 117 g στο κεκλιμένο αμόνι, δηλαδή χαμηλότερα από το κρίσιμο όριο 250g που ορίζει το πρότυπο EN 1078, υποδεικνύοντας πολύ καλή απόδοση απορρόφησης.

Για την διεξαγωγή πειραματικών δοκιμών, η κατασκευή του κράνους έγινε σε εκτυπωτή FDM, με διαφορετικές παραμέτρους εκτύπωσης για το κάθε υλικό. Η εσωτερική επένδυση και το εξωτερικό κέλυφος συν αρμολογήθηκαν χωρίς να χρειάζεται κόλλα, χάρης το γεωμετρικό κούμπωμα του σχεδιασμού. Οι δοκιμές έγιναν σύμφωνα με το ευρωπαϊκό πρότυπο BS EN 1078, το οποίο ορίζει τις συνθήκες αξιολόγησης για κράνη ποδηλάτου. Οι συνθήκες δοκιμής πραγματοποιήθηκαν με δύο τύπους αμονιού, σε επίπεδο (flat anvil) από ύψος 1497 mm (ταχύτητα 5.42 m/s) και σε κεκλιμένο (kerbstone anvil) από ύψος 1064 mm (ταχύτητα 4,57 m/s).

Ακόμα χρησιμοποιήθηκε τεχνητή κεφαλή με επυταχυνσιόμετρο 2000g για την καταγραφή των επιταχύνσεων. Τα αποτελέσματα επιβεβαίωσαν την ακρίβεια του αριθμητικού ελέγχου καθώς οι διαφορές μεταξύ προσομοιώσεων και πειραμάτων ήταν μικρές της τάξεως των 6% και 16% αντίστοιχα. Οι επιταχύνσεις και στις δυο περιπτώσεις ήταν κάτω από το όριο ασφαλείας των 250 g.

Συνοψίζοντας, η μελέτη αυτή αποδεικνύει ότι οι αυξητικές δομές αποτελούν ισχυρή εναλλακτική λύση για την κατασκευή επενδύσεων σε κράνη. Ο συνδυασμός γεωμετρικής καινοτομίας, σύγχρονων μεθόδων προσομοίωσης και ψηφιακής κατασκευής επιτρέπει τη δημιουργία ελαφριών και ασφαλέστερων κρανών,

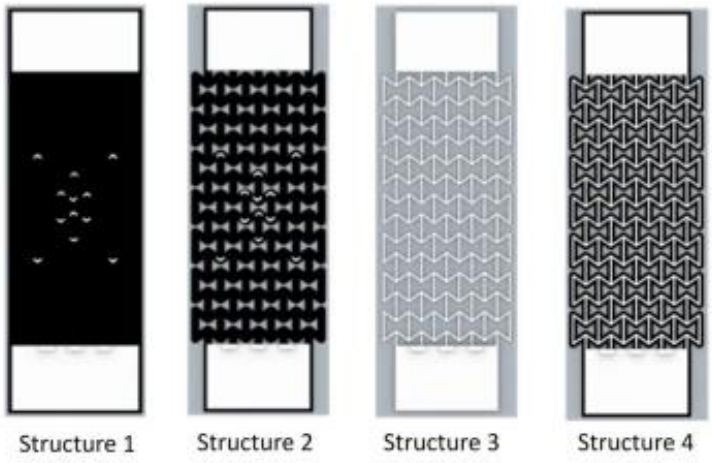
καθώς και την μείωση του κόστους ανάπτυξης μέσω περιορισμού φυσικών δοκιμών. Ακόμα το προτεινόμενο κράνος μπορεί να προσαρμοστεί σε διαφορετικά σχήματα και μεγέθη κεφαλιού, ενώ παράλληλα προσφέρει ανώτερη προστασία συγκριτικά με τα παραδοσιακά υλικά όπως EPS.

3.1.2 Kinesiology Tape

Οι μυοσκελετικοί τραυματισμοί αποτελούν ένα διαδεδομένο πρόβλημα, ειδικότερα στον χώρο του αθλητισμού, επηρεάζοντας αρνητικά την φυσική απόδοση των αθλητών. Η ευρεία χρήση kinesiology tape (KT) έχει αποδειχθεί ωφέλιμη στην μείωση του πόνου και στην υποστήριξη της αποκατάστασης. Ωστόσο, η παραδοσιακή μορφή της (KT) περιορίζεται από το γεγονός ότι δρα μονοδιάστατα και συχνά απαιτεί πολύπλοκες τεχνικές εφαρμογής με πολλαπλά κομμάτια. Το άρθρο των Meeusen κ.ά. [59], εισάγει μια καινοτόμο προσέγγιση αξιοποιώντας auxetic δομές, με στόχο την καλύτερη προσαρμογή στις καμπύλες του σώματος και την εξατομίκευση της θεραπείας.

Στην πειραματική μελέτη, εξετάστηκε η συμπεριφορά διαφορετικών γεωμετριών με στόχο την βέλτιστη απόδοση αυξητικής δομής. Χρησιμοποιήθηκαν αναλυτικές εξισώσεις και πειραματικά δεδομένα για να υπολογιστεί ο λόγος Poisson και δημιουργήθηκαν για δοκιμή πέντε διαφορετικές γεωμετρίες. Στην συνέχεια δοκιμάστηκαν 4 τύποι KT συγκριτικά με την παραδοσιακή μορφή όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.1.2.1:

- Κλασική KT
- Κλασική KT με laser cut auxetic μοτίβο
- 3d printed auxetic δομή (χρήση υλικού TPU)
- Συνδυασμός δομών (laser cut KT και 3d printed-auxetic)



Σχήμα 3.1.2.1 *Τύποι KT που εξετάστηκαν.*

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι μόνο η πλήρως 3d εκτυπωμένη auxetic δομή (structure 3) παρουσίασε σημαντικά αρνητικό λόγο Poisson, αποδεικνύοντας την επιτυχή ενσωμάτωση auxetic ιδιοτήτων. Στην συνέχεια διερευνάται η πρακτική εφαρμογή της auxetic δομής σε συνηθισμένες περιπτώσεις τραυματισμών. Διαπιστώθηκε ότι στον αγκώνα, η auxetic δομή επιτρέπει την κάλυψη όλης της άρθρωσης με ένα μόνο κομμάτι, χωρίς τον περιορισμό της κινητικότητας, ενώ με την παραδοσιακή KT χρειάζονται δυο ξεχωριστά κομμάτια, με εφαρμογή σε συγκεκριμένες γωνίες και επίπεδα τάσης με αποτέλεσμα να είναι μια χρονοβόρα διαδικασία.

Στην περίπτωση μυϊκής έντασης στο αντιβράχιο, η ταινία εξαλείφει την ανάγκη εγκάρσιας ενίσχυσης, καθώς με μια μόνο auxetic KT επιτυγχάνεται διπλής κατεύθυνσης δράση (κατά μήκος και εγκάρσια). Επιπλέον, η αυξημένη επιφανειακή κάλυψη και η μορφολογική προσαρμοστικότητα καθιστούν την auxetic KT, κατάλληλη για υποστήριξη της περιτονίας, τη μείωση συμφύσεων και τη θεραπεία μεγάλων περιοχών, χωρίς την ανάγκη πολλαπλών κομματιών. Αυτή η λειτουργικότητα αναμένεται να μειώσει σημαντικά τα σφάλματα στην εφαρμογή και να ενισχύσει τη συμμόρφωση των χρηστών με τη θεραπεία.

3.1.3 Crash Box προφυλακτήρα αυτοκινήτου

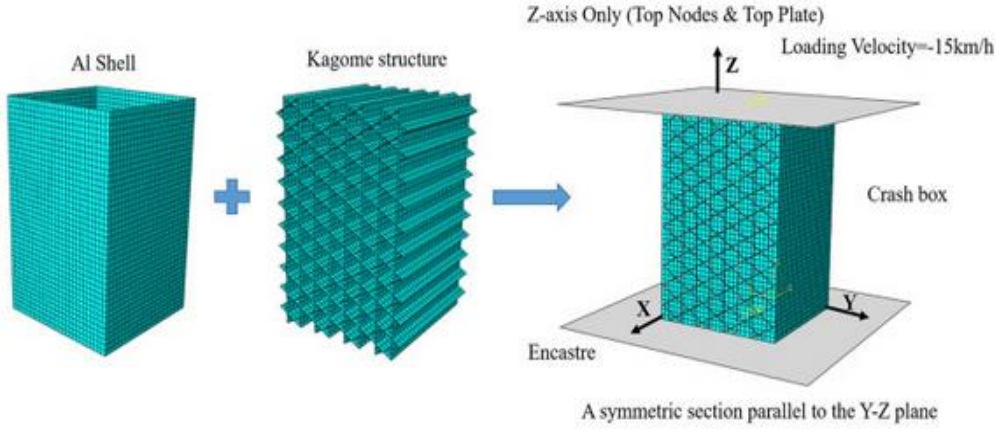
Το Crash Box τοποθετείται μεταξύ του πλαισίου του αυτοκινήτου και του προφυλακτήρα με στόχο την απορρόφηση ενέργειας κατά την σύγκρουση μειώνοντας την δύναμη που μεταφέρεται στους επιβάτες. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι κυρίως αλουμίνιο και χάλυβας υψηλής αντοχής, τα οποία έχουν υψηλό βάρος και περιορισμένη ευελιξία.

Το ερευνητικό άρθρο των Hou κ.ά. [60], μελετάει την χρήση lattice και auxetic δομών, ώστε να προσφέρει υψηλή απόδοση απορρόφησης ενέργειας με ταυτόχρονη μείωση βάρους, με στόχο την προσαρμογή σε μελλοντικά crash boxes στην αυτοκινητοβιομηχανία. Για την πειραματική αξιολόγηση έγινε παρασκευή νημάτων PA6/CF (πολυαμίδιο 6 ενισχυμένο με ίνες άνθρακα), δημιουργώντας 3 είδη νημάτων με διαφορετικά ποσοστά ινών CF (Carbon Fiber) 5%, 10% και 15%.

Στην συνέχεια έγινε ο σχεδιασμός τεσσάρων διαφορετικών γεωμετριών κυψελωτών πλεγμάτων, με ίση σχετική πυκνότητα ώστε να είναι επιτρεπτή ή άμεση συγκριτική αξιολόγηση. Για την εκτύπωση χρησιμοποιήθηκε η τεχνολογία FDM με καθορισμένες συνθήκες για το υλικό και έγινε παρατήρηση της μικροδομής με χρήση SEM για την αξιολόγηση της ομοιόμορφής κατανομής των ινών CF στο πολυμερές. Επίσης, έγιναν τυποποιημένες δοκιμές εφελκυσμού για τις ιδιότητες του υλικού και συμπίεσης (quasi static) που προσφέρουν κρίσιμα δεδομένα για τον καθορισμό των Crashworthiness χαρακτηριστικών καταγράφοντας την καμπύλη δύναμης-μετατόπισης για τον υπολογισμό της μέγιστης δύναμης (Fmax), της απορρόφησης ενέργειας (EA) και της ειδικής απορρόφησης ενέργειας (SEA).

Βάσει των πειραματικών δεδομένων από τις δοκιμές εφελκυσμού προσδιορίστηκαν οι εξαρτήσεις των μηχανικών ιδιοτήτων από το ποσοστό ινών CF, παρατηρώντας ότι το μετρό ελαστικότητας, η αντοχή και η οριακή παραμόρφωση αυξάνονται ή μειώνονται με γραμμική σχέση ως προς το ποσοστό ενίσχυσης. Επιπλέον εκτελέστηκαν αριθμητικές προσομοιώσεις αξονικής συμπίεσής σε δομές τύπου hexagonal και re-entrant, χρησιμοποιώντας το λογισμικό Abaqus/Explicit, διαπιστώνοντας καλή συμφωνία με τα πειραματικά αποτελέσματα.

Για την αξιολόγηση της απορρόφησης ενέργειας για τις δομές πλέγματος που θα χρησιμοποιηθούν ως πυρήνες στο crash box, έγινε προσομοίωση με ίδιες συνθήκες καταλήγοντας στην δομή με την μέγιστη απορρόφηση ενέργειας (Kagome) που θα χρησιμοποιηθεί για περεταίρω βελτίωση. Το crash box αποτελείται από αλουμινένιο σωληνοειδές κέλυφος (6061 AL) και εσωτερικά με τη δομή Kagome από PA6/CF.



Σχήμα 3.1.3.1 *Συνδυασμός Al κελύφους και δομής Kagome για Crash box.*

Σύμφωνα με τις προδιαγραφές RCAR, η μέγιστη αντοχή (δύναμη) δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 180 kN σε ταχύτητα 15 km/h και το crash box πρέπει να απορροφά την ενέργεια που αντιστοιχεί σε πρόσκρουση οχήματος βάρους 12000 kg. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης ήταν ικανοποιητικά με συνολική απορρόφηση (EA) 6855 j, ειδική απορρόφηση ενέργειας (SEA) 10020 j, μέγιστη δύναμη πρόσκρουσης 174 kN και συνολική μάζα 0,782 kg.

Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε εφαρμογή πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης μέσω της μεθόδου NSGA-II και της χρήσης επιφανειών απόκρισης RSM, επιτυγχάνοντας ένα νέο crash box με σημαντικά βελτιωμένα χαρακτηριστικά. Η τελική βέλτιστη λύση παρουσίασε αύξηση της ειδικής απορρόφησης ενέργειας (SEA) κατά 17%, ενώ η συνολική μάζα μειώθηκε κατά 16%. Η συνολική απορρόφηση ενέργειας διατηρήθηκε ίδια, ενώ η μέγιστη δύναμη μειώθηκε στις 150 kN, ικανοποιώντας πλήρως τις απαιτήσεις του πρότυπου RCAR.

Η τελική κατασκευή πληροί της προδιαγραφές των κανονισμών και ξεπερνάει σε απόδοση άλλες τεχνικές λύσεις που έχουν παρουσιαστεί στην βιβλιογραφία, αναδεικνύοντας την ισχύ των σύγχρονων εργαλείων προσθετικής κατασκευής, της βελτιστοποίησης και της ολοκληρωμένης προσέγγισης υλικό – δομή – απόδοση στο σχεδιασμό προηγμένων συστημάτων ασφαλείας.

3.1.4 Σύστημα Προφυλακτήρα Αυτοκινήτου Με Αυξητικές Δομές

Λόγω της αυξανόμενης ανάγκης για βελτίωση της οδικής ασφάλειας, η ερευνητική εργασία των Wang κ.ά. [61] προτείνει ένα νέο σύστημα προφυλακτήρα βασισμένο σε υλικό με αρνητικό λόγο Poisson (NPR). Η έρευνα εστιάζει στις μετωπικές συγκρούσεις που αποτελούν το συχνότερο είδος, υπογραμμίζοντας τον κρίσιμό ρόλο του προφυλακτήρα, που είναι το πρώτο σημείο επαφής σε μία σύγκρουση και συνεπώς έχει σημαντική ευθύνη τόσο στην προστασία του οχήματος και των επιβατών όσο και στην ασφάλεια των πεζών.

Η αυξητική γεωμετρία θα εισαχθεί στην δοκό και στον απορροφητή, με στόχο την ταυτόχρονη επίτευξη ικανοποιητικής αντοχής σε μετωπική σύγκρουση και παράλληλα την ασφάλεια των πεζών με μείωση τραυματισμού στο κάτω άκρο. Επιπλέον, συνδυάζονται προηγμένες τεχνικές βελτιστοποίησης, θέτοντας τις βάσεις για ένα ολοκληρωμένο σύστημα.

Η μελέτη βασίζεται σε απλοποιημένο μοντέλο οχήματος τύπου Toyota Camry από τη βάση δεδομένων NCAC (National Crash Analysis Center). Κατά την διαδικασία μοντελοποίησης αρχικά έγινε η σχεδίαση της NPR δοκού και του NPR απορροφητή, που βασίζονται σε κυψελοειδείς auxetic εξαγωνικές δομές. Η μοντελοποίηση των δυο βασικών στοιχείων έγινε με ευέλικτο τρόπο ώστε να επιτρέπεται η βελτιστοποίηση των γεωμετρικών και υλικών χαρακτηριστικών τους (παραμετρική μεθοδολογία).

Στην συνέχεια έγινε η συναρμολόγηση του πλήρως NPR προφυλακτήρα, ο οποίος αποτελείται από:

- NPR δοκό (beam)
- NPR απορροφητή (absorber)
- Εξωτερικό κάλυμμα (skin) – διατηρείται ίδιο με του συμβατικού προφυλακτήρα
- Crash boxes – παραμένουν όπως στο αρχικό μοντέλο

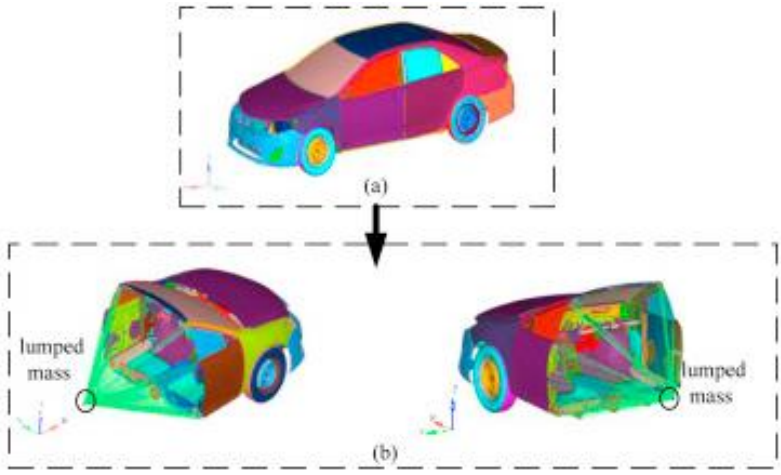
Η δοκός και ο απορροφητής αποτελούνται από τριστρωματικές δομές NPR (sandwich structures) οι οποίες περιλαμβάνουν εσωτερικά εξαγωνικά κυψελοειδή στρώματα, εξωτερικά λεπτά κελύφη και η σύνδεση μεταξύ των στρωμάτων γίνεται με συγκόλληση. Για την σταθερότητα των προσομοιώσεων όλα τα επιμέρους εξαρτήματα συνδέονται μέσω rigid connection method, δηλαδή με άκαμπτες συνδέσεις που δεν επιτρέπουν σχετική μετατόπιση μεταξύ των μελών. Η χρήση κατάλληλων υλικών όπως πολυπροπυλένιο (PP) για τον απορροφητή και αλουμινίου 6061 για την δοκό, σε συνδυασμό με προηγμένα αριθμητικά μοντέλα LS-DYNA (Cowper-Symonds και Johnson-cook), προσδίδει στο σύστημα προσομοίωση υψηλής ακρίβειας.

Η διαφορά στην μάζα αποδεικνύει ότι ο σχεδιασμός επιτυγχάνει βελτίωση των επιδόσεων χωρίς προσθήκη βάρους, με το παραδοσιακό σύστημα προφυλακτήρα να ζυγίζει 12.73 kg ενώ το NPR σύστημα 12.57 kg.

Για την δημιουργία και επικύρωση των αριθμητικών μοντέλων, υλοποιούνται δυο βασικές συνθήκες πρόσκρουσης:

- Σύγκρουση με κάτω άκρο πεζού (lower Legform impact)
- Μετωπική σύγκρουση με άκαμπτο τοίχο (frontal rigid wall impact)

Για την μείωση του υπολογιστικού κόστους η προσομοίωση δεν χρησιμοποιεί το πλήρες 3d μοντέλο του οχήματος, αλλά διατηρούνται μόνο τα εμπρός τμήματα του αυτοκινήτου ενώ τα πίσω τμήματα αντικαθίστανται με lumped mass elements, τα οποία προστίθενται ως βάρος συνδεδεμένο με άκαμπτους δεσμούς (rigid links) όπως φαίνεται στο σχήμα 3.1.4.1 ενώ παράλληλα διατηρείται τον κέντρο βάρους και η ροπή αδράνειας του αρχικού τμήματος. Εξασφαλίζοντας έτσι ρεαλιστικά δυναμικά χαρακτηριστικά ενώ μειώνει δραματικά τον χρόνο προσομοίωσης.



Σχήμα 3.1.4.1 *Απλοποιημένο μοντέλο με συγκέντρωση μάζας.*

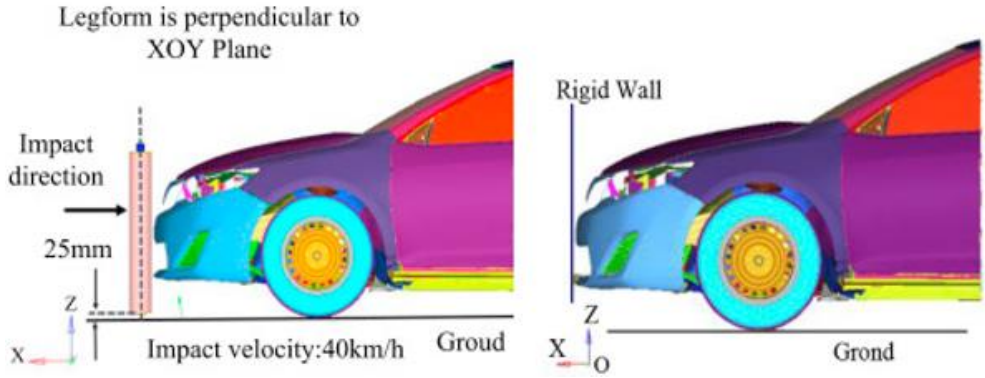
Για την προσομοίωση πρόσκρουσης με πεζό, χρησιμοποιείται μοντέλο τύπου TRL-LFI (Transport Research Laboratory – Lower Legform Impactor), το οποίο είναι σχεδιασμένο σύμφωνα με τις προδιαγραφές της ευρωπαϊκής νομοθεσίας GTR9 και μοντελοποιεί ρεαλιστικά το κάτω άκρο ενός μέσου ενήλικου άνδρα. Το μοντέλο επιτρέπει την αξιολόγηση τριών δεικτών τραυματισμού:

- Tibia acceleration (g) – κάταγμα κνήμης
- Knee bending angle (°) – ρήξη συνδέσμων
- Knee shearing displacement (mm) – κάταγμα άρθρωσης

Η πρόσκρουση χρησιμοποιείται σε συγκεκριμένο σημείο του προφυλακτήρα, το σημείο L_o που ορίζεται ως το κεντρικό σημείο ζώνης πρόσκρουσης. Στο συγκεκριμένο άρθρο μελετάται η σύγκρουση μόνο σε αυτό το σημείο για εξοικονόμηση χρόνου, αν και στην νομοθεσία προβλέπεται δοκιμή και σε άλλα σημεία. Επιπλέον η ταχύτητα πρόσκρουσης είναι 40 km/h και η διάρκεια προσομοίωσης 0.03 s.

Για την προσομοίωση μετωπικής πρόσκρουσης, αναπαρίσταται το σενάριο σύγκρουσης σε σταθερό εμπόδιο (τοίχο), με ταχύτητα 40 km/h. Το τοίχωμα μοντελοποιείται με εντολή RIGIDWALL_PLANAR στο LS-DYNA και ο χρόνος προσομοίωσης είναι στα 0.07s. για την αποτίμηση της προστασίας των επιβατών οι δείκτες απόδοσης που μελετώνται είναι :

- Impact force (kN) – συνολική δύναμη μεταξύ οχήματος και τοίχου
- Displacement das pane (mm) – μετρά τη μείωση του χώρου επιβατών
- Επιτάχυνση κάτω από το κάθισμα του οδηγού (g) – δείκτης τραυματισμού
- Ενέργεια απορρόφησης του προφυλακτήρα (j) – απόδοση συστήματος



Σχήμα 3.1.4.2 *Σενάρια προσομοίωσης.*

Έπειτα γίνεται επικύρωση των αριθμητικών μοντέλων σύγκρουσης μέσω ελέγχων ενεργειακής συνέπειας και συμμόρφωσης με τα όρια του κανονισμού. Η συνολική ενέργεια παραμένει σταθερή και η hourglass energy διατηρείται εντός των αποδεκτών ορίων (<5%), επιβεβαιώνοντας την αξιοπιστία των προσομοιώσεων. Οι δείκτες τραυματισμού πεζού καλύπτουν της απαιτήσεις GTR9, με εξαίρεση την γωνία κάμψης γονάτου, η οποία απαιτεί περεταίρω βελτιστοποίηση. Παράλληλα, το μοντέλο μετωπικής σύγκρουσης καταγράφει σημαντική μείωση στην :

- Επιτάχυνση στο κάθισμα οδηγού από 58,24 g (παραδοσιακός προφυλακτήρας) σε 54,29 g (NPR)
- Δύναμη πρόσκρουσης από 602.1 kN (παραδοσιακός προφυλακτήρας) σε 493,32 kN (NPR).

Με χρήση προσεγγιστικού μοντέλου τύπου Response Surface Model και δύο εξελιγμένων αλγορίθμων (NSGA-II και ESA), η μελέτη επιτυγχάνει πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση επτά βασικών γεωμετρικών παραμέτρων του συστήματος. Τα αποτελέσματα δείχνουν σημαντική μείωση των δεικτών τραυματισμού χωρίς αύξηση της μάζας και μέσω της κυψελοειδούς δομής με αρνητικό λόγο Poisson το σύστημα πετυχαίνει υψηλή απορρόφηση ενέργειας και ευέλικτη μηχανική απόκριση. Η συνολική προσέγγιση καθιστά το NPR σύστημα μια υποσχόμενη πρόταση για την επόμενη γενιά έξυπνων και ασφαλών προφυλακτήρων.

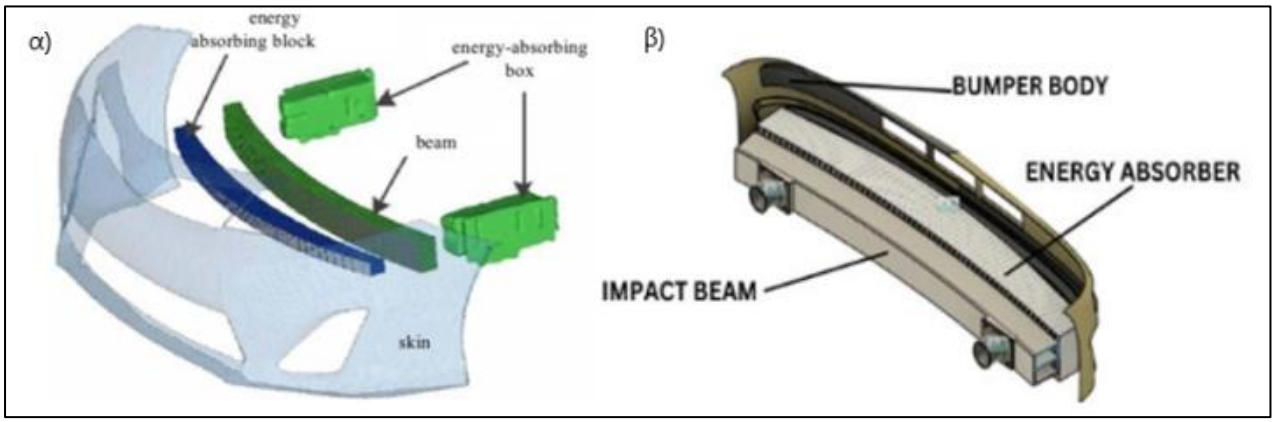
Κεφάλαιο 4: Προφυλακτήρας και Ανάλυση Κρούσης

4.1 Δομή προφυλακτήρα

Ο προφυλακτήρας του αυτοκινητικού έχει σημαντικό ρόλο στην προστασία του οχήματος και των επιβατών κατά την κρούση. Αποτελείται από τμήματα που τοποθετούνται στα εμπρός και πίσω μέρη του οχήματος με στόχο την μείωση των ζημιών που προκαλούνται από συγκρούσεις, απορροφώντας ένα μέρος της ενέργειας της πρόσκρουσης. Όταν το αυτοκίνητο συγκρούεται με ένα αντικείμενο ή άλλο όχημα, η ενέργεια αυτή πρέπει να διαχυθεί μέσω του προφυλακτήρα ώστε να περιοριστούν οι επιπτώσεις σε ευαίσθητα μέρη του οχήματος και στους επιβάτες. Ο τρόπος απορρόφησης της ενέργειας εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως υλικά, κατασκευή και δομή του προφυλακτήρα.

Τα βασικά μέρη ενός προφυλακτήρα που σχετίζονται με την κρούση αναφέρονται αναλυτικά παρακάτω και απεικονίζονται στο σχήμα 4.1.1:

- Κέλυφος (Fascia): Είναι το ορατό εξωτερικό μέρος του συγκροτήματος προφυλακτήρα. Είναι κατασκευασμένο από πλαστικό συνήθως από πολυπροπυλένιο (PP), πολυαιθυλένιο (PE), ABS, που διαθέτουν καλή αντοχή σε κρούσεις, επιτρέποντας στο κέλυφος να παραμορφώνεται χωρίς να σπάσει και να επιστρέφει στην αρχική του κατάσταση όταν η κρούση είναι μικρή. Το κέλυφος έχει σχεδιαστεί να απορροφάει ένα μικρό μέρος της ενέργειας που μεταφέρεται από την σύγκρουση, μέσω της παραμόρφωσης.
- Απορροφητής ενέργειας (energy absorber): τοποθετείται μεταξύ του εξωτερικού κελύφους και της μεταλλικής δοκού του προφυλακτήρα, βοηθώντας στην απορρόφηση ενέργειας χαμηλής και μεσαίας ταχύτητας κρούσης. Κατασκευάζεται από ελαφριά και ανθεκτικά υλικά όπως αφρώδες πολυπροπυλένιο (EPP) ή σύνθετα πλαστικά υλικά. Κατά την σύγκρουση παραμορφώνεται ελεγχόμενα, απορροφώντας την κινητική ενέργεια πριν φτάσει στο μεταλλικό πλαίσιο του αυτοκινήτου ελαχιστοποιώντας την δύναμη που ασκείται στους επιβάτες αλλά και στις ζημιές τον βασικών δομικών στοιχείων.
- Μπάρα ενίσχυσης (reinforcement beam): βρίσκεται πίσω από το κέλυφος και τον απορροφητή ενέργειας και προσφέρει μηχανική αντοχή και προστασία στο όχημα, απορροφώντας υψηλές δυνάμεις μιας σύγκρουσης. Συνδέεται με το αμάξωμα μέσω στηριγμάτων (crash boxes), και κατασκευάζεται από ανθεκτικά υλικά όπως χάλυβα υψηλής αντοχής, αλουμίνιο και σύνθετα υλικά όπως carbon fiber.
- Crash boxes: είναι δομές απορρόφησης ενέργειας και βρίσκονται ανάμεσα στην μπάρα ενίσχυσης και το αμάξωμα του αυτοκινήτου. Λειτουργούν ως αποσβεστήρες ενέργειας πριν η δύναμη μεταφερθεί στο υπόλοιπο όχημα. Μπορούν να αντικατασταθούν εύκολα, και μειώνουν το κόστος επισκευής καθώς αντί να παραμορφωθεί το αμάξωμα καταστρέφονται αυτά. Κατασκευάζονται από αλουμίνιο, χάλυβα υψηλής αντοχής και σύνθετα υλικά.



Σχήμα 4.1.1 *Δομή συστήματος προφυλακτήρα.*

4.2 Πρότυπα και κανονισμοί

Η κατασκευή των προφυλακτήρων του αυτοκινήτου (εμπρός και πίσω) αποτελεί ένα σημαντικό μέρος σχεδιασμού των οχημάτων, καθώς εκτός από το design του εξωτερικού κελύφους, αφορά την προστασία του οχήματος, των επιβατών και των πεζών σε περίπτωση σύγκρουσης. Τα τελευταία χρόνια, τα πρότυπα και οι κανονισμοί για την κατασκευή τους, έχουν εξελιχθεί σημαντικά προκειμένου να διασφαλιστεί η ασφάλεια, ενσωματώνοντας μια ποικιλία απαιτήσεων για την ανθεκτικότητα των προφυλακτήρων, την απορρόφηση ενέργειας, την προστασία των επιβατών και την επίδραση στους πεζούς.

Στην Ευρώπη η κατασκευή και έγκριση προφυλακτήρων ρυθμίζεται από ένα σύνολο κανονισμών και οδηγιών που στοχεύουν στη βελτίωση της οδικής ασφάλειας. Ο κανονισμός **ECE R42** της Οικονομικής Επιτροπής για την Ευρώπη την Ηνωμένων Εθνών (UNECE) καθορίζει τις απαιτήσεις για την αντοχή των προφυλακτήρων των επιβατικών οχημάτων (κατηγορία M1), εξασφαλίζοντας ότι κατά την διάρκεια χαμηλών ταχυτήτων σύγκρουσης διασφαλίζεται η προστασία βασικών εξαρτημάτων του οχήματος καθώς και η ασφάλεια των επιβατών.

Οι βασικές απαιτήσεις του κανονισμού, έχουν να κάνουν με δοκιμές πρόσκρουσης σε χαμηλές ταχύτητες στους εμπρόσθιους και οπίσθιους προφυλακτήρες. Κατά τις δοκιμές σύμφωνα με τον κανονισμό δεν επιτρέπεται να υπάρχουν σοβαρές ζημιές στο σύστημα φωτισμού, στο σύστημα καυσίμου και ψύξης, στο σύστημα διεύθυνσης και πέδησης καθώς και στην εξάτμιση και τις αναρτήσεις. Επίσης ο προφυλακτήρας μπορεί να παραμορφωθεί αλλά η επισκευή του ή αντικατάσταση να είναι εύκολή χωρίς υψηλό κόστος. Επιπλέον το υλικό κατασκευής πρέπει να έχει καλή ενεργειακή απορρόφηση κατά την σύγκρουση, χρησιμοποιώντας αφρώδη υλικά, πολυμερή και σύνθετα. Ακόμα γίνεται αναφορά στο ύψος που τοποθετούνται οι προστατευτικές διατάξεις για να είναι αποτελεσματικές. [62]

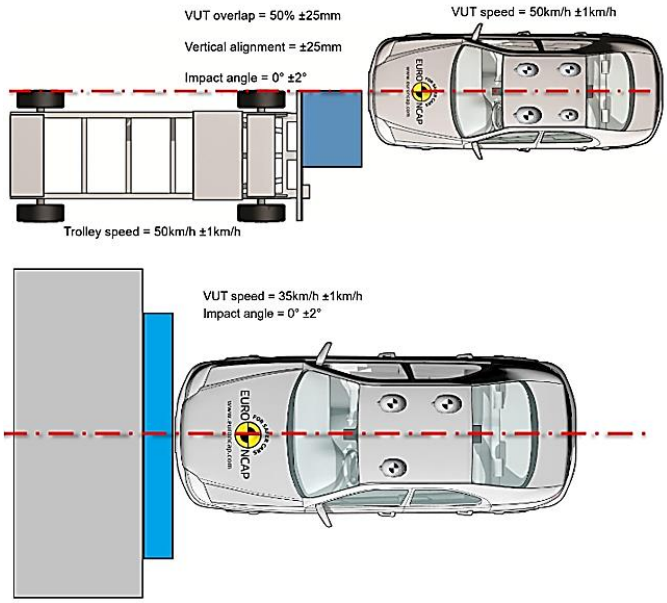
Άλλο ένα βιομηχανικό πρότυπο που ακολουθείται και καθορίζει κριτήρια για την αντοχή και την αποτελεσματικότητα των προφυλακτήρων είναι ο **RCAR** που αναπτύχθηκε από το διεθνή συμβούλιο έρευνας για τις επισκευές αυτοκινήτων. Να σημειωθεί ότι δεν είναι υποχρεωτικός κανονισμός όμως λαμβάνεται υπόψη από αυτοκινητοβιομηχανίες στον σχεδιασμό των οχημάτων. Ο στόχος είναι η μείωση του κόστους επισκευής σε μικρές συγκρούσεις, θέτοντας κατευθυντήριες γραμμές για τον σχεδιασμό προφυλακτήρων και άλλων δομικών μερών. [63]

Οι δοκιμές σύγκρουσης χωρίζονται στις εξής κατηγορίες:

- Πλήρους εύρους σύγκρουση: η δοκιμή πραγματοποιείται με ταχύτητα 15 km/h, με σύγκρουση του οχήματος σε σταθερό εμπόδιο ύψους 710 mm, αξιολογώντας την απορρόφηση ενέργειας και την σταθερότητα του προφυλακτήρα.
- Σύγκρουση σε γωνία: η δοκιμή πραγματοποιείται με ταχύτητα 15 km/h, το όχημα συγκρούεται σε εμπόδιο το οποίο καλύπτει το 15% του πλάτους του, αξιολογώντας την προστασία και την απορρόφηση ενέργειας στις γωνίες του οχήματος ώστε να μη επηρεάζονται προβολείς και φτερά.

Στην συνέχεια για τον έλεγχο ασφαλείας το όχημα περνάει από διαφορές δοκιμές σύγκρουσης, από τον ανεξάρτητο οργανισμό **Euro NCAP** (European New Car Assessment Program) που αξιολογεί την ασφάλεια των αυτοκινήτων μέσω αυστηρών δοκιμών πρόσκρουσης και άλλων κριτηρίων. Τα αποτελέσματα χρησιμοποιούνται για να παρέχουν πληροφορίες στους καταναλωτές σχετικά με την ασφάλεια.

Όσο αφορά την μετωπική σύγκρουση και τον εμπρόσθιο προφυλακτήρα, γίνονται δύο δοκιμές όπως φαίνονται και στο σχήμα 4.1.1. Η μια δοκιμή πραγματοποιείται με μετακινούμενο εμπόδιο (MPDB-Mobile Progressive Deformable Barrier), που γίνεται πρόσκρουση σε μετακινούμενο τρέιλερ 1400 kg με 50% επικάλυψη του προφυλακτήρα σε ταχύτητα 50 km/h προσομοιώνοντας σύγκρουση δύο κινούμενων οχημάτων. Η επόμενη δοκιμή είναι με άκαμπτο εμπόδιο (Full Width Rigid Barrier – FWRB), και το όχημα προσκρούει με το 100% της επιφάνειας σε σταθερό τοίχο με ταχύτητα 35 km/h. [64]



Σχήμα 4.2.1 *α) Δοκιμή με μετακινούμενο εμπόδιο MPDB, β) Δοκιμή με άκαμπτο εμπόδιο FWRB.*

Ο φορέας Euro NCAP, εξετάζει την προστασία των επιβατών με αισθητήρες που καταγράφουν τις δυνάμεις και τις επιταχύνσεις που υφίστανται διάφορα μέρη του σώματος κατά την σύγκρουση. Χρησιμοποιούνται μοντέλα που προσομοιώνουν την ανατομία, την μάζα και τις αντιδράσεις του ανθρώπινου σώματος, εξετάζοντας δείκτες τραυματισμού όπως το κεφάλι, αυχένας και θώρακας. Τα αποτελέσματα ερμηνεύονται με αστέρια (0-5), αλλά και κάθε κατηγορία (ενήλικες, παιδιά, πεζοί) με ξεχωριστό ποσοστό προστασίας.

Επιπλέον, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι οι αυτοκινητοβιομηχανίες πριν τα αυτοκίνητα υποβληθούν σε δοκιμές από οργανισμούς, πραγματοποιούν δικά τους τεστ για την διασφάλιση συμμόρφωσης με τους κανονισμούς, την βελτίωση της σχεδίασης πριν την παραγωγή με προσομοιώσεις FEA αλλά και μετέπειτα με πραγματικά crash test παρόμοια με αυτά του Euro NCAP. Ο τελικός στόχος είναι η διασφάλιση της ασφάλειας και της υψηλής βαθμολογίας αυξάνοντας παράλληλα την εμπορική αξία του μοντέλου.

4.3 Αυξητική δομή στο σύστημα προφυλακτήρα

Στο σύστημα του προφυλακτήρα, η ενσωμάτωση αυξητικής δομής σε κρίσιμα μέρη, προσφέρει βελτιωμένη απορρόφηση ενέργειας, αυξημένη αντοχή στις κρούσεις και μειωμένο βάρος. Χρησιμοποιώντας γεωμετρίες όπως αυτές που αναφερθήκαν στο κεφάλαιο 2.5, επιτρέπει στο υλικό αλλά και σε ολόκληρο το σύστημα, να διαχειρίζεται καλύτερα τα φορτία και την παραμόρφωση, βελτιώνοντας την ασφάλεια των επιβατών αλλά και τον πεζών.

Στην ερευνητική εργασία των Wang κ.ά. [65] διερευνάται ένα καινοτόμο σύστημα προφυλακτήρα που αποτελείται από μια μπάρα ενίσχυσης (reinforcement beam) και έναν απορροφητή (energy absorber) με αρνητικό λόγο Poisson, με στόχο την βελτίωση της αντοχής του οχήματος σε συγκρούσεις και την προστασία των πεζών. Μέσω βελτιστοποίησης πολλαπλών αντικειμενικών στόχων, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δείχνουν σημαντική βελτίωση της συνολικής απόδοσης του προφυλακτήρα.

Οι Hou κ.ά. [66] παρουσιάζουν ένα καινοτόμο crash box με κέλυφος αλουμινίου και 3d εκτυπωμένο πυρήνα από δικτυωτές δομές (lattice structure). Ο πυρήνας είναι κατασκευασμένος με την μέθοδο FFF, και το υλικό που χρησιμοποιείται είναι σύνθετο PA6/CF. Εξετάστηκαν 4 τύποι δομών (εξαγωνική, Kagome, re-entrant, τριγωνική), με την δομή Kagome να επιτυγχάνει τη μέγιστη ειδική απορρόφηση ενέργειας (SEA). Αναπτύχθηκε ένα ολοκληρωμένο μοντέλο για την ανάλυση των μηχανικών και γεωμετρικών παραμέτρων στην απόδοση πρόσκρουσης. Επίσης εφαρμόστηκε βελτιστοποίηση με στόχο τη μέγιστη SEA και μικρότερη μάζα.

Ακόμα, οι Chawla κ.ά. [67] προτείνουν ένα καινοτόμο σχεδιασμό του απορροφητή (energy absorber), χρησιμοποιώντας βελτιστοποιημένες δικτυωτές δομές (lattice structures) και πολυϋλικά για την επίτευξη ισορροπίας μεταξύ απόδοσης σε συγκρούσεις χαμηλής ταχύτητας και προστασίας των πεζών σε υψηλές ταχύτητες. Με τη χρήση διαφορετικών συνδυασμών υλικών και 576 προσομοιώσεων πεπερασμένων στοιχείων αναπτύχθηκαν 66 βελτιστοποιημένα σχέδια. Δύο υπό κλίμακας απορροφητές ενέργειας επικυρώθηκαν μέσω

δοκιμών, με τον βελτιστοποιημένο να παρουσιάζει αύξηση στην απορρόφηση ενέργειας και μείωση της μέγιστης τάσης.

Βασιζόμενοι στα παραπάνω ερευνητικά άρθρα, καθίσταται σαφές ότι η ενσωμάτωση αυξητικών δομών αλλά και ο συνδυασμός με σύνθετα υλικά φέρνει μεγάλες βελτιώσεις στην απορρόφηση ενέργειας και στη συνολική απόδοση του προφυλακτήρα. Επιπλέον σχεδόν όλα τα στοιχεία του συστήματος προφυλακτήρα μπορούν να βελτιστοποιηθούν με την χρήση αυξητικών δομών και να παραχθούν με προσθετική κατασκευή.

4.4 Μηχανική κρούσης (Γενική θεωρεία)

Είναι σημαντικό να γίνει αναφορά και ανάλυση των δυο βασικών τύπων κρούσεων δηλαδή της ελαστικής και ανελαστικής κρούσης καθώς είναι απαραίτητο για την κατανόηση της συμπεριφοράς ενός συστήματος προφυλακτήρα . Η πρόσκρουση του προφυλακτήρα με ένα αντικείμενο είναι αρκετά περίπλοκη καθώς οι δυνάμεις και οι παραμορφώσεις δεν είναι σταθερές και εξαρτώνται από την ταχύτητα και τη γωνία πρόσκρουσης. Ξεκινώντας, με τις βασικές εξισώσεις και έννοιες, σε μια κρούση η συνολική ορμή πριν και μετά την πρόσκρουση διατηρείται. Η εξίσωση που χρησιμοποιείται για να υπολογιστεί η τελική κατάσταση του συστήματος μετά την κρούση είναι:

$$m_1 u_1 + m_2 u_2 = m_1 u_1' + m_2 u_2' \tag{4.4.1}$$

Όπου:

- m_1, m_2 είναι οι δύο μάζες των σωμάτων (π.χ. αυτοκίνητο και εμπόδιο)
- υ_1,υ_2 είναι οι αρχικές ταχύτητες πριν την κρούση.
- u_1, u είναι οι τελικές ταχύτητες μετά την κρούση

Ο σκοπός του προφυλακτήρα είναι να απορροφήσει ενέργεια και να μειώσει τις δυνάμεις πρόσκρουσης. Συνεπώς κατά την κρούση η κινητική ενέργεια μπορεί να διατηρηθεί εάν είναι ελαστική κρούση ή να χαθεί εάν είναι ανελαστική μετατρέποντάς την σε θερμότητα και παραμόρφωση.

Η αρχική κινητική ενέργεια είναι :

$$KE_{αρχ} = \frac{1}{2} m u^2 \tag{4.4.2}$$

Η ενέργεια που απορροφάται από τον προφυλακτήρα και διαχέεται μέσω της παραμόρφωσης, αν θεωρηθεί ανελαστική κρούση, είναι:

$$E_{αΠορ} = kE_{αρχ} - kE_{Τελ} \tag{4.4.3}$$

Η δύναμη που δέχεται ο προφυλακτήρας κατά την διάρκεια της κρούσης υπολογίζεται από την αλλαγή της ορμής, δηλαδή:

$$F = \frac{\Delta P}{\Delta t} = \frac{m\,(u' - u)}{t} \tag{4.4.4}$$

Όπου:

- Δp είναι η μεταβολή της ορμής
- t είναι η διάρκεια της κρούσης

Για παράδειγμα με την χρήση αυξητικής δομής, βελτιώνεται η απορροφητική ικανότητα του συστήματος, με αποτέλεσμα η διάρκεια της κρούσης να αυξηθεί και η δύναμη να μειωθεί, βελτιώνοντας έτσι την απόδοση του συστήματος στην ασφάλεια των επιβατών.

Η ενέργεια που απορροφάται μέσω πλαστικής παραμόρφωσης, υποθέτοντας μια γραμμική σχέση μεταξύ δύναμης και παραμόρφωσης, δίνεται από τον τύπο:

$$E = \frac{1}{2} k d^2 \tag{4.4.5}$$

Όπου:

- k είναι η σταθερά ακαμψίας του προφυλακτήρα, η οποία εξαρτάται από το υλικό και την δομή
- d είναι η απόσταση παραμόρφωσης

Για τον προσδιορισμό του ποσοστού της ενέργεια που διατηρείται μετά την κρούση (συντελεστής ανάκτησης e), χρησιμοποιείται ο τύπος:

$$\mathrm{e} = \frac{u_2' - u_1}{u_1 - u_2} \tag{4.4.6}$$

Αν:

- e =1, η κρούση είναι πλήρως ελαστική.
- e =0, η κρούση είναι πλήρως ανελαστική και υπάρχει μέγιστη απορρόφηση ενέργειας
- 0 < e < 1, υπάρχει μερική απορρόφηση ενέργειας

Κατά την μετωπική σύγκρουση, οι δυνάμεις που αναπτύσσονται εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες όπως είναι:

- Η μάζα και η ταχύτητα του οχήματος πριν την κρούση
- Το υλικό και η δομή του προφυλακτήρα
- Το είδος του αντικειμένου που προσκρούει (μάζα, εάν κινείται, εάν είναι άκαμπτο ή παραμορφώσιμο)
- Η γωνία πρόσκρουσης

4.5 Δοκιμές ανθεκτικότητας (crashworthiness test) – Προσομοιώσεις

Οι δοκιμές ανθεκτικότητας είναι κρίσιμες για την αξιολόγηση της ασφάλειας των αυτοκινήτων και την συμπεριφορά του συστήματος προφυλακτήρα κατά την διάρκεια συγκρούσεων. Οι προσεγγίσεις γίνονται με φυσικές δοκιμές που περιλαμβάνουν πραγματικές συγκρούσεις και υπολογίστηκες προσομοιώσεις όπως ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Analysis - FEA), για την εκτίμηση της συμπεριφοράς του προφυλακτήρα.

Το πλεονέκτημα των υπολογιστικών προσομοιώσεων είναι ότι προσφέρουν πολλές δυνατότητες προσαρμογής και επιτρέπουν την επαναληπτική προσαρμογή του σχεδιασμού μέχρι να επιτευχθούν τα επιθυμητά αποτελέσματα. Στην περίπτωση της εισαγωγής αυξητικής δομής στο σύστημα του προφυλακτήρα θα πρέπει να υπολογιστούν από τον έλεγχο και την καμπύλη δύναμης - μετατόπισης οι παρακάτω όροι και έννοιες για την απόδοση της δομής.

Απορρόφηση ενέργειας (EA): Υπολογίζεται από το ολοκλήρωμα της δύναμης ως προς την μετατόπιση.

$$EA = \int_0^{Xmax} F(x)dx \tag{4.5.1}$$

Όπου:

- F(x): Η δύναμη φόρτισης
- X_{max}: Η συνολική μετατόπιση

Ειδική απορρόφηση ενέργειας (SEA): Είναι η ενέργεια ανά μονάδας μάζας της αυξητικής δομής

$$SEA = \frac{EA}{m} \tag{4.5.2}$$

Όπου:

- EA: Η συνολική απορρόφηση ενέργειας
- m: Η μάζα της αυξητικής δομής

Μέση δύναμη συντριβής (average crush load - Favg): Ορίζεται ως η απορρόφηση ενέργειας προς την παραμόρφωση. Δείχνει την σταθερότητα της δύναμης κατά την σύγκρουση συμπεραίνοντας εάν το σύστημα απορροφάει την ενέργεια με σταθερό ρυθμό.

$$Favg = \frac{EA}{deformation} \tag{4.5.3}$$

Μέγιστη δύναμη συντριβής (Peak crushing force - PCF - Fmax): Είναι η μάζα του προφυλακτήρα επί την επιτάχυνση της βαρύτητας. Στον σχεδιασμό του προφυλακτήρα, αυτή η δύναμη πρέπει να διατηρείται εντός ενός ορίου, καθώς μεγάλη Fmax θα προκαλέσει υψηλή επιτάχυνση στους επιβάτες με αποτέλεσμα υψηλή πιθανότητα σοβαρού τραυματισμού. Η σχέση 4.5.4 δίνει την εκτίμηση του μέγιστου φορτίου με βάση το βάρος του προφυλακτήρα, η πραγματική τιμή εξαρτάται και από τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού, όπως η αντοχή σε θλίψη και το μέτρο ελαστικότητας.

$$Fmax = curb\ weight\ of\ the\ bumper * g \tag{4.5.4}$$

Αποδοτικότητα Δύναμης Συντριβής (Crush Force Efficiency - CFE): Είναι ο λόγος μεταξύ της μέσης δύναμης συντριβής και μέγιστης δύναμης συντριβής, που αξιολογεί την απόδοση των δομών κατά την διάρκεια της κρούσης. Δείχνει πόσο ομοιόμορφα κατανέμεται η δύναμη κατά τη διάρκεια της παραμόρφωσης του προφυλακτήρα ή άλλων απορροφητικών δομών. Στόχος είναι η CFE να πλησιάζει το 100%, το οποίο σημαίνει ότι η απορρόφηση της δύναμης είναι ομοιόμορφη.

$$CFE = \frac{Favg}{Fmax} * 100 \tag{4.5.5}$$

Επαλήθευση εγκυρότητας προσομοιώσεων

Κατά την προσομοίωση FEA (Finite Element Analysis), ενδέχεται να παρουσιαστούν αριθμητικά σφάλματα ή αστάθειες. Για την εξασφάλιση της εγκυρότητας των αποτελεσμάτων γίνεται σύγκριση της συνολικής εισερχόμενης ενέργειας και απορροφημένης ενέργειας. Από τον νόμο διατήρησης ενέργειας κατά την διάρκεια της σύγκρουσης, η ενέργεια δεν δημιουργείται ούτε καταστρέφεται, αλλά μετατρέπεται σε:

- Εσωτερική ενέργεια (internal Energy – IE)
- Ενέργεια τριβής/ολίσθησης (sliding Energy)
- Hourglass Energy (αριθμητικό σφάλμα λόγω παραμορφώσεων του πέλματος)

Η Hourglass Energy (HE) είναι μια αριθμητική μορφή ενέργειας που εμφανίζεται σε προσομοιώσεις πεπερασμένων στοιχείων (FEA), λόγω αριθμητικών σφαλμάτων. Εάν η Hourglass Energy - EI είναι υψηλή, τότε το μοντέλο δεν αντιδράει σωστά και υπάρχει αριθμητική αστάθεια με τα στοιχεία να παραμορφώνονται χωρίς να αντιστέκονται, απορροφώντας ενέργεια χωρίς να μεταφέρουν φορτίο. Για την αξιολόγηση του μοντέλου (FEA), χρησιμοποιείται ο λόγος ολικής ενέργειας (Total Energy – TE) προς Hourglass Energy (HE). Στόχος είναι η HE να είναι όσο τον δυνατό χαμηλότερη περίπου 5% της συνολικής ενέργειας (TE) ώστε η προσομοίωση να θεωρείται αξιόπιστη.

Για την επαλήθευση της διατήρησης ενέργειας στο σύστημα, χρησιμοποιείται το energy ratio (e). Ουσιαστικά δείχνει αν η συνολική ενέργεια που εισάγεται στο σύστημα ισούται με την ενέργεια που καταναλώνεται.

Το Energy Ratio (e) ορίζεται ως:

$$\mathrm{e} = \frac{E_i + Es + E_d + E_{ke} + Eh}{W_{e\times t} + E_i^0 + E_{\mathrm{ke}}^0} \tag{4.5.6}$$

Όπου:

- Ei: Εσωτερική ενέργεια (internal energy)
- Es: Ενέργεια ολίσθησης (Sliding Energy)
- Ed: Ενέργεια απόσβεσης (Damping Energy)

- E_{ke}: Κινητική ενέργεια (Kinetic Energy)
- Eh: Ενέργεια Hourglass (Hourglass Energy)
- Wext: Εξωτερικό έργο (External Work)
- E_i^0: Αρχική εσωτερική ενέργεια
- E_{ke}^0: Αρχική κινητική ενέργεια

Από τα αποτελέσματα που προκύπτουν εάν το e = 1, τότε η προσομοίωση είναι έγκυρη, υποδεικνύοντας ένα πιο σταθερό και αξιόπιστο αποτέλεσμα. Βέβαια, στις περισσότερος περιπτώσεις είναι δύσκολο να επιτευχθεί αυτή η τιμή λόγω του σφάλματος μοντελοποίησης (π.χ. ανακριβείς συνοριακές συνθήκες, ακατάλληλο πλέγμα), δημιουργώντας λανθασμένη κατανομή της ενέργειας στο μοντέλο. Γι' αυτό τον λόγο, αποκλίσεις έως ± 7% είναι αποδεκτές.

Εάν το e > 1 σημαίνει ότι έχει προστεθεί τεχνητή ενέργεια στο μοντέλο, αυξάνοντας τις συνολικές τιμές ενέργειας και προκαλώντας αστάθεια. Αυτό οφείλεται συνήθως από αριθμητικά σφάλματα όπως Hourglass modes και λανθασμένη πλέξη (mesh). Αντίθετα εάν e < 1 σημαίνει πως κατά την προσομοίωση δεν απορροφήθηκε ή δεν καταγράφηκε σωστά μέρος τις αρχικής ενέργειας, γεγονός που αποτελεί ένδειξη πιθανού αριθμητικού ή φυσικού σφάλματος. [68]

Κεφάλαιο 5: Μεθοδολογία πειράματος και ανάλυση δομών

5.1 Στόχος και μεθοδολογία πειραματικής μελέτης

Σκοπός του πειράματος είναι η διερεύνηση της δυνατότητας χρήσης αυξητικών δομών ως εναλλακτική λύση για την αντικατάσταση του συμβατικού απορροφητή ενέργειας (energy absorber) που βρίσκεται ανάμεσα στο κέλυφος και την κύρια δοκό στο εμπρόσθιο προφυλακτήρα. Η αξιολόγηση θα γίνει μέσω θεωρητικών υπολογισμών και προσομοιώσεων πρόσκρουσης (impact test simulations) σύμφωνα με τις προδιαγραφές κανονισμών σε ταχύτητα χαμηλής μετωπικής πρόσκρουσης.

Έγινε η επιλογή τριών διαφορετικών αυξητικών δομών σε μορφή τετραγωνικών δοκιμίων, με πάχος ίσο με αυτό ενός συμβατικού απορροφητή. Οι γεωμετρίες επιλέχτηκαν βάσει βιβλιογραφίας και προηγούμενων μελετών με στόχο να διερευνηθεί πως η διαφοροποίηση στην αρχιτεκτονική τους επηρεάζει την μηχανική συμπεριφορά και ειδικότερα την απορρόφηση ενέργειας, την κατανομή των τάσεων και παραμορφώσεων καθώς και το επίπεδο ακαμψίας των μέγιστων δυνάμεων που αναπτύσσονται κατά την διάρκεια της κρούσης. Επιπλέον, οι δομές επιλέχθηκαν και σχεδιάστηκαν ώστε να είναι κατασκευάσιμες μέσω προσθετικής κατασκευής και συγκεκριμένα με την μέθοδο FDM.

Η μεθοδολογία βασίζεται στον σχεδιασμό και στην δημιουργία μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method- FEM) για κάθε δομή τα οποία υποβάλλονται σε προσομοιώσεις πρόσκρουσης σε χαμηλή ταχύτητα. Οι συνθήκες φόρτισης ορίστηκαν σύμφωνα με το σενάριο φόρτισης που περιγράφεται στο ερευνητικό άρθρο των Chawla κ.ά. [69], όπου η χαμηλή ταχύτητα μετωπικής πρόσκρουσης προσομοιώνεται ως κρούση οχήματος με ισοδύναμη μάζα μέσω εκκρεμούς (pendulum impact). Συγκεκριμένα λαμβάνεται υπόψη όχημα μέσης κατηγορίας με μάζα 1500 kg και αρχική ταχύτητα 1.05 m/s, ενώ το απαιτούμενο ελάχιστο ποσό ενέργειας υπολογίζεται σε περίπου 391 j. Στη παρούσα μελέτη, για υπολογιστικού λόγους, το αρχικό σενάριο προσαρμοστικέ υπό κλίμακα, με ακολουθώντας παρόμοια μεθοδολογία με το συγκεκριμένο άρθρο, διατηρώντας την ομοιότητα της πρόσκρουσης.

Για την ολοκληρωμένη αξιολόγηση των τριών αυξητικών δομών, κρίνεται απαραίτητη η σύγκριση τους με ένα αντιπροσωπευτικό συμβατικό απορροφητή ενέργειας. Για τον σκοπό αυτό θα δημιουργηθεί τετραγωνικό δοκίμιο από διογκωμένο πολυπροπυλένιο (expanded Polypropylene- EPP), το οποίο αποτελεί το πλέον διαδεδομένο υλικό που χρησιμοποιείται σήμερα στους απορροφητές ενέργειας προφυλακτήρων. Το δοκίμιο EPP θα έχει ίδιες γεωμετρικές διαστάσεις και πάχος με τα τρία δείγματα αυξητικών δομών, ώστε η σύγκριση να πραγματοποιηθεί υπό ισοδύναμες συνθήκες. Με αυτό τον τρόπο καθίσταται εφικτή η αξιολόγηση της σχετικής βελτίωσης ή ενδεχόμενης υστέρησης των αυξητικών δομών έναντι του καθιερωμένου υλικού αναφοράς.

5.2 Επιλογή δομών

Η τρείς χαρακτηριστικές αυξητικές δομές που εξετάζονται στην παρούσα μελέτη, έχουν μελετηθεί εκτενώς στην διεθνή βιβλιογραφία και παρουσιάζουν διαφορετικούς μηχανισμούς παραμόρφωσης και απορρόφησης ενέργειας. Οι δομές αυτές είναι οι Re-entrant, Anti-tetra chiral και Arrowhead. Η συγκεκριμένη επιλογή δικαιολογείται τόσο από το ερευνητικό τους ενδιαφέρον όσο και από την επάρκεια διαθέσιμων πειραματικών και αριθμητικών δεδομένων, τα οποία επιτρέπουν την αξιόπιστη επαλήθευση και σύγκριση των αποτελεσμάτων.

Η Re-entrant αποτελεί την πλέον κλασική αυξητική γεωμετρία και χρησιμοποιείται ως πρότυπο σε συγκριτικές μελέτες. Η μηχανική της απόκριση εξαρτάται άμεσα από τις γεωμετρικές παραμέτρους (γωνία, λόγος πλευρών και πάχος τοιχωμάτων), οι οποίες καθορίζουν τόσο την δυσκαμψία όσο και το επίπεδο plateau stress κατά την φόρτιση. Αριθμητικές προσομοιώσεις και πειραματικές δοκιμές χαμηλής ταχύτητας έχουν δείξει ότι, κατά την πρόσκρουση, η δομή αναπτύσσει ένα διακριτό plateau stress με σχετικά σταθερή απόκριση μέχρι την τελική παραμόρφωση. Ειδικότερα, μελέτες υπό δυναμική φόρτιση καταδεικνύουν ότι η δομή μπορεί να απορροφήσει έως και 30%-50% περισσότερη ενέργεια ανά μονάδα όγκου σε σχέση με ισοδύναμες συμβατικές διατάξεις, γεγονός που την καθιστά κατάλληλη για εφαρμογές παθητικής ασφάλειας όπου απαιτείται υψηλή αντοχή σε πρόσκρουση.

Η anti-tetra chiral δομή έχει μελετηθεί σε συνθήκες θλίψης και κρούσης, λόγω του ιδιαίτερου μηχανισμού παραμόρφωσης που βασίζεται στην κάμψη των συνδέσμων γύρω από τους άκαμπτους κυκλικούς

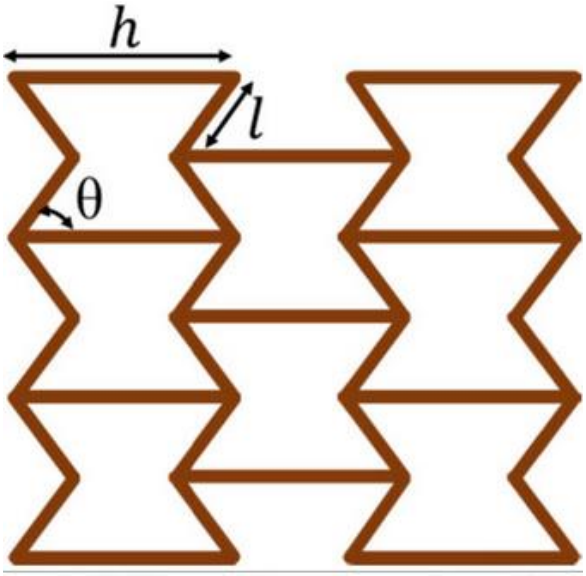
ή τετραγωνικούς κόμβους. Η ιδιαιτερότητα αυτή οδηγεί σε αρνητικές τιμές λόγου Poisson (ν= -0.6 έως -1.4), οι οποίες μπορούν να ρυθμιστούν μέσω των γεωμετρικών παραμέτρων των συνδέσμων. Σε συνθήκες κρούσης, η δομή εμφανίζει σχετικά χαμηλότερη αιχμή φορτίου σε σύγκριση με άλλες αυξητικές δομές, με αποτέλεσμα την ομαλή και ελεγχόμενη απόκριση.

Η arrowhead έχει αποδειχθεί ιδιαίτερα αποδοτική σε συνθήκες κρούσης, με συμπεριφορά που χαρακτηρίζεται από την εμφάνιση διαδοχικών ζωνών παραμόρφωσης. Εξίσου με τις δυο παραπάνω δομές οι πειραματικές και αριθμητικές μελέτες έχουν δείξει ότι σε χαμηλές ταχύτητες πρόσκρουσης η arrowhead παρουσιάζει υψηλή ειδική απορρόφηση ενέργειας καθιστώντας την μια αξιόπιστη αυξητική δομή για την συγκεκριμένη εφαρμογή του προφυλακτήρα.

Επιπλέον, στην παρούσα μελέτη η επιλογή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των δομών έγινε αυτούσια από το ερευνητικό έργο των Najafi κ.ά. [70]. Η επιλογή αυτή περιορίζει σκόπιμα τον χώρο σχεδίασης ώστε η διερεύνηση να εστιάσει στον τύπο αρχιτεκτονικής και όχι σε παράλληλη βελτιστοποίηση παραμέτρων. Επιπλέον με αυτό τον τρόπο διασφαλίζεται η κατασκευή, η πειραματική εγκυρότητα και η άμεση δυνατότητα αριθμητικής προσομοίωσης. Παράλληλα, θα πραγματοποιηθεί ανάλυση με σκοπό την κατανόηση του τρόπου με τον οποίο τα επιμέρους γεωμετρικά χαρακτηριστικά επηρεάζουν τις μηχανικές ιδιότητες των δομών, καθώς και την απορρόφηση ενέργειας υπό συνθήκες κρούσης.

5.3 Ανάλυση δομής Re-entrant

Το παρόν κεφάλαιο επικεντρώνεται στη διερεύνηση του τρόπου με τον οποίο τα βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά της δομής re-entrant (σχήμα 5.3.1), όπως η γωνία κυψέλης, το πάχος των τοιχωμάτων και ο λόγος πλευρών επηρεάζουν την απορρόφηση ενέργειας, την συμπεριφορά υπό συνθήκες κρούσης και τις μηχανικές ιδιότητες.



Σχήμα 5.3.1 *Σχηματική απεικόνιση της γεωμετρίας της δομής Re-entrant. Τα βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά ορίζονται από το ύψος της κυψέλης (h), το μήκος της πλευράς (l) και τη γωνία επαναφοράς (θ), οι οποίες καθορίζουν τη μηχανική απόκριση της δομής υπό θλιπτικά και κρουστικά φορτία.[71]*

Επίδραση γωνίας κυψέλης θ

Η γωνία θ των τοιχωμάτων αποτελεί τον σημαντικότερο γεωμετρικό παράγοντα που καθορίζει τον λόγο Poisson και τη μηχανική απόκριση της δομής. Σύμφωνα με θεωρητικές και αριθμητικές αναλύσεις, η αύξηση της γωνίας οδηγεί σε πιο αρνητικές τιμές λόγου Poisson, καθώς η γεωμετρία διευκολύνει την εγκάρσια σύμπτυξη κατά την θλίψη. Παράλληλα σε χαμηλές ταχύτητες πρόσκρουσης το μέσο επίπεδο θλιπτικής τάσης (plateau stress) αυξάνεται με την αύξηση της γωνίας γεγονός που σημαίνει ότι η γωνία γίνεται πιο ανθεκτική σε θλιπτικά φορτία. Ωστόσο, σε υψηλότερες ταχύτητες η επίδραση της γωνίας μειώνεται αισθητά, καθώς οι αδρανειακές επιδράσεις κυριαρχούν στη μηχανική απόκριση.

Επιπλέον, πολύ μεγάλες γωνίες περιορίζουν το εύρος της διαθέσιμης παραμόρφωσης πριν την τελική πυκνωτική αστοχία, με αποτέλεσμα η συνολική απορρόφηση ενέργειας να μην αυξάνεται απεριόριστα.

Συνεπώς, η επιλογή της γωνίας πρέπει να γίνεται με γνώμονα την ισορροπία μεταξύ plateau stress και ικανότητας μεγάλης παραμόρφωσης λαμβάνοντας υπόψη το καθεστώς φόρτισης. [72]

Επίδραση του λόγου μήκους πλευρών (h/l)

Ο λόγος μήκους πλευρών (h/l) επηρεάζει σημαντικά την ευκαμψία και την αντοχή της δομής. Σύμφωνα με τις θεωρητικές και αριθμητικές αναλύσεις, η μείωση του λόγου (h/l) οδηγεί σε πιο έντονο αρνητικό λόγο Poisson, καθώς διευκολύνεται η εγκάρσια σύμπτυξη των κυψελών. Παράλληλα, η μείωση του λόγου συνδέεται με αύξηση plateau stress και μεγάλη δυσκαμψία γεγονός που ενισχύει την αντοχή σε χαμηλή ταχύτητα πρόσκρουσης περιορίζοντας όμως την δομή να δεχθεί μεγάλες παραμορφώσεις μέχρι την πυκνωτική φάση.

Αντίθετα, η αύξηση του (h/l) οδηγεί σε επιμήκη κελιά με αυξημένη ευκαμψία και δυνατότητα μεγαλύτερης απορρόφησης ενέργειας μέσω παραμόρφωσης. Σε δυναμικές συνθήκες, ο δείκτης ευαισθησίας καταδεικνύει ότι οι δομές με υψηλότερο λόγο μήκους πλευρών είναι πιο ευαίσθητες στην αύξηση της ταχύτητας κρούσης, εμφανίζοντας μεγαλύτερες διακυμάνσεις στο plateau stress.[72]

Επίδραση του πάχους τοιχωμάτων (t)

Το πάχος των τοιχωμάτων σχετίζεται άμεσα με την σχετική πυκνότητα της δομής και αποτελεί βασικό παράγοντα για το plateau stress. Μεγαλύτερο πάχος οδηγεί σε αυξημένη δυσκαμψία και υψηλότερο plateau stress, γεγονός που βελτιώνει την αντοχή της δομής σε συνθήκες θλιπτικής φόρτισης και χαμηλής ταχύτητας πρόσκρουσης. Αντίθετα μικρότερα πάχη προσδίδουν καλύτερη ικανότητα παραμόρφωσης και αυξημένη ειδική απορρόφηση ενέργειας (SEA), λόγω χαμηλότερης μάζας, αλλά συνδέονται με χαμηλότερο plateau stress και αυξημένη ευαισθησία σε δυναμικές συνθήκες φόρτισης. [72]

5.3.1 Υπολογισμός λόγου Poisson (re-entrant)

Ο λόγος Poisson της re-entrant δομής μπορεί να εκτιμηθεί θεωρητικά μέσω ανάλυσης των Gibson και Ashby [73] για κυψελοειδείς δομές, η οποία βασίζεται στην παραδοχή ότι τα τοιχώματα της κυψέλης λειτουργούν ως δοκοί Euler υπό κάμψη. Η γενική αναλυτική έκφραση για τον λόγο Poisson ενός κανονικού honeycomb υπό μονοαξονική φόρτιση στη διεύθυνση y δίνεται από:

$$v_y^* = -\frac{\varepsilon x}{\varepsilon y} = \frac{\left(\frac{h}{L} + \sin\theta\right) \cdot \sin\vartheta}{(\cos\theta)^2} \tag{5.3.1}$$

Για κανονικές κυψελοειδείς δομές (θετικές τιμές θ) η παραπάνω σχέση δίνει θετικό λόγο Poisson, ενώ για re-entrant γεωμετρίες η γωνιά λαμβάνεται αρνητική, με αποτέλεσμα την εμφάνιση αρνητικού λόγου Poisson. Με τον τρόπο αυτό η εξίσωση 5.3.1 μπορεί να χρησιμοποιηθεί άμεσα για την περιγραφή τόσο συμβατικών όσο και αυξητικών κυψελοειδών δομών.

Επιπλέον σε αλλά άρθρα χρησιμοποιείται η αναλυτική έκφραση του Gibson and Ashby για τον αποτελεσματικό λόγο Poisson Vy κυψελοειδών δομών, η οποία αντιστοιχεί σε μονοαξονική φόρτιση κατά την διεύθυνση y και ορίζει τον λόγο της εγκάρσιας παραμόρφωσης στη διεύθυνση x προς την παραμόρφωση στη διεύθυνση y. Ο αστερίσκος στον τύπο υποδηλώνει ότι πρόκειται για μακροσκοπική γεωμετρικά επαγόμενη ιδιότητα της δομής και όχι του υλικού των τοιχωμάτων.

Ωστόσο, το μοντέλο αυτό ισχύει αυστηρά στο πλαίσιο μικρών παραμορφώσεων και στατικών συνθηκών φόρτισης. Πρόσφατες μελέτες και συγκεκριμένα των Hu κ.ά. [74] έχουν δείξει ότι ο αποτελεσματικός λόγος Poisson των re-entrant δομών δεν είναι σταθερός αλλά εξαρτάται από την παραμόρφωση. Συγκεκριμένα κατά την ελαστική φάση ο λόγος Poisson λαμβάνει έντονες αρνητικές τιμές, οι οποίες μειώνονται με την αύξηση της θλίψης, φθάνοντας σε λιγότερο αρνητικές ή και θετικές τιμές πριν την πυκνωτική φάση.

Επιπροσθέτως, σε δυναμικές συνθήκες κρούσης, οι αδρανειακές επιδράσεις μπορούν να επηρεάσουν τον μετρούμενο λόγο Poisson, γεγονός που καταδεικνύει τη σημασία των ταχυτήτων φόρτισης στη μηχανική απόκριση των αυξητικών δομών. Τα αποτελέσματα των θεωρητικών εκφράσεων του Gibson and Ashby βρίσκονται σε καλή συμφωνία με αριθμητικές προσομοιώσεις σε μικρές παραμορφώσεις, ωστόσο παρουσιάζουν μεγάλες αποκλίσεις, όπου ενεργοποιούνται μη γραμμικοί μηχανισμοί παραμόρφωσης.

Σε αντίθεση λοιπόν με το κλασικό μοντέλο των Gibson and Ashby, η αναλυτικότερη προσέγγιση όπου λαμβάνεται υπόψη ότι κατά την θλιπτική φόρτιση η γωνία των λοξών τοιχωμάτων της re-entrant δομής μεταβάλλεται από την αρχική τιμή θ_0 σε:

$$\theta = \theta_0 - \Delta\theta$$

(5.3.2)

Ως αποτέλεσμα, οι αξονικές και εγκάρσιες παραμορφώσεις της μονάδας κυψέλης εκφράζονται ως συναρτήσει της στιγμιαίας γωνίας, ενώ ο λόγος Poisson υπολογίζεται από την σχέση:

$$v = -\frac{\varepsilon x}{\varepsilon_y} = \frac{\sin\theta_0 - \frac{2t}{l}}{\frac{h}{l} - \cos\theta_0} \cdot \frac{\cos\theta_0 - \cos(\vartheta_0 - \Delta\theta)}{\sin\theta_0 - \sin(\theta_0 - \Delta\theta)}$$

(5.3.3)

Η εξίσωση αυτή αποτελεί γενίκευση του κλασικού μοντέλου, καθώς επιτρέπει την περιγραφή της μεταβολής του λόγου Poisson σε συνθήκες μεγάλων παραμορφώσεων. Παρέχει επομένως μια πιο ακριβή θεωρητική απεικόνιση της συμπεριφοράς των re-entrant δομών, συνδυάζοντας την επίδραση της γεωμετρίας του επιπέδου παραμόρφωσης και των δυναμικών φαινομένων που εμφανίζονται κατά την φόρτιση.

5.3.2 Υπολογισμός σχετικής πυκνότητας (re-entrant)

Η σχετική πυκνότητα (ρ^*/ρ_s) αποτελεί θεμελιώδεις παράμετρο στον χαρακτηρισμό κυψελοειδών και αυξητικών δομών. Ορίζεται ως ο λόγος της μέσης πυκνότητας ρ^* προς την πυκνότητα του υλικού από το οποίο αποτελούνται τα τοιχώματα ρ_s. Πρακτικά, η σχετική πυκνότητα αντιστοιχεί στο ποσοστό του χώρου που καταλαμβάνει το στερεό υλικό σε σχέση με τα κενά της γεωμετρίας. Αποτελεί συνεπώς καθαρά γεωμετρικά επαγόμενη παράμετρο, ανεξάρτητη από τη φύση του υλικού, η οποία καθορίζεται από τις διαστάσεις των συνδέσμων, το πάχος των τοιχωμάτων και τη διάταξη των κελιών.

Σύμφωνα με την ανάλυση των Gibson and Ashby [75], η σχετική πυκνότητα της μονάδας κελιού μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\frac{\rho^*}{\rho_s} = \frac{\frac{t}{l} \cdot \left(\frac{h}{l} + 2\right)}{2 \cdot \sin\theta_0 \cdot \left(\frac{h}{L} - \cos\theta_0\right)}$$

(5.3.4)

Η σχετική πυκνότητα έχει καθοριστική σημασία, καθώς επηρεάζει άμεσα τις μηχανικές ιδιότητες. Υψηλότερη σχετική πυκνότητα συνεπάγεται με αυξημένη δυσκαμψία, μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας και υψηλότερο plateau stress, αλλά με περιορισμένη δυνατότητα παραμόρφωσης μέχρι την πυκνωτική φάση. Αντίθετα χαμηλότερη σχετική πυκνότητα οδηγεί σε πιο εύκαμπτες δομές με μεγαλύτερη ικανότητα παραμόρφωσης και αυξημένη απορρόφηση ενέργειας αν μονάδα βάρους, αλλά χαμηλότερη αντοχή.

5.3.3 Υπολογισμός μέτρου ελαστικότητας (re-entrant)

Το φαινόμενο μέτρο ελαστικότητας της δομής re-entrant δεν καθορίζεται αποκλειστικά από το υλικό των τοιχωμάτων, αλλά εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη γεωμετρία της κυψέλης. Σύμφωνα με το θεωρητικό μοντέλο που ανέπτυξαν οι Masters & Evans [76], όταν οι λόγοι διαστάσεων είναι τέτοιοι ώστε η παραμόρφωση να προκύπτει κυρίως μέσω κάμψης των τοιχωμάτων, δηλαδή για λεπτά τοιχώματα (t/l <<1), το μέτρο ελαστικότητας μπορεί να εκφραστεί:

$$E_1 = E_s \cdot \left(\frac{t}{l}\right)^3 \cdot \frac{\sin\theta}{\left(\frac{h}{L} - \cos\vartheta\right) \cdot \cos^2\theta}$$

(5.3.5)

$$E_2 = E_s \cdot \left(\frac{t}{L}\right)^3 \cdot \frac{\left(\frac{h}{L} - \cos\theta\right)}{\sin^3\theta}$$

(5.3.6)

Όπου E_s είναι το μέτρο ελαστικότητας του υλικού των τοιχωμάτων.

Από τις παραπάνω σχέσεις παρατηρείται ότι το φαινόμενο μέτρο ελαστικότητας κλιμακώνεται με τον κύβο του λόγου t/l, γεγονός που αποδεικνύει ότι ακόμη και μικρές μεταβολές στο πάχος των τοιχωμάτων έχουν

καθοριστική επίδραση στην δυσκαμψία της δομής. Επιπλέον, η γωνία θ και ο λόγος h/l διαμορφώνουν τη μηχανική απόκριση, επηρεάζοντας άμεσα τόσο το μέγεθος όσο και την ανισοτροπία του μέτρου ελαστικότητας κατά τις δυο κύριες διευθύνσεις.

5.3.4 Υπολογισμός μέσης θλιπτικής τάσης (re-entrant)

Κατά την θλιπτική φόρτιση η μηχανική απόκριση της δομής χαρακτηρίζεται από τρείς διακριτές φάσεις. Αρχικά, παρουσιάζει μια σχεδόν γραμμική ελαστική συμπεριφορά, όπου η εφαρμοζόμενη τάση αυξάνεται αναλογικά με την παραμόρφωση. Στη συνέχεια, κατά την πρόοδο της θλίψης, ενεργοποιούνται μηχανισμοί λυγισμού ή σχηματισμού πλαστικών αρθρώσεων στα τοιχώματα των κυψελών. Η φάση αυτή συνοδεύεται από την εμφάνιση ενός εκτεταμένου ‘οροπεδίου’ στην καμπύλη τάσης παραμόρφωσης, κατά το οποίο η τάση παραμένει σχεδόν σταθερή παρά την περαιτέρω αύξηση της παραμόρφωσης, το στάδιο αυτό ορίζεται ως μέση θλιπτική τάση η plateau stress. Τέλος, σε πολύ υψηλές παραμορφώσεις, η δομή οδηγείται στην ζώνη πυκνοποίησης όπου οι κυψέλες καταρρέουν πλήρως και η τάση αυξάνεται απότομα.

Η μέση θλιπτική τάση αποτελεί καθοριστικό μηχανικό μέγεθος, καθώς συνδέεται άμεσα με την ικανότητα της δομής να απορροφά μηχανική ενέργεια μέσω μόνιμης παραμόρφωσης, χωρίς σημαντική αύξηση του εφαρμοζόμενου φορτίου. Η θεωρητική προσέγγιση των Hu κ.ά. [77], βασίζεται στο ισοζύγιο μεταξύ του έργου της εξωτερικής δύναμης και της απορροφούμενης πλαστικής ενέργειας στις αρθρώσεις των κυψελών.

Η ενέργεια που απορροφάται από τις πλαστικές αρθρώσεις κατά την κατάρρευση ενός κελιού είναι:

$$E_P = M\rho \cdot (8\theta_0) \tag{5.3.7}$$

Όπου :

- $M_p = \frac{1}{4}\sigma_y b t^2$ είναι η πλήρης πλαστική ροπή των τοιχωμάτων
- σ_y: όριο διαρροής υλικού
- b: πάχος εκτός επιπέδου
- t: πάχος τοιχώματος

Το έργο που παράγεται από την θλιπτική τάση πάνω στο κελί είναι:

$$w = \bar{\sigma_s} \cdot H \cdot s \tag{5.3.8}$$

Όπου:

- $H = 2L \cdot \sin\theta_0 - 4t$: μετατόπιση συμπίεσης
- $S = 2b(h - L \cdot \cos\theta_0)$: εγκάρσια διατομή κελιού
- $\bar{\sigma_s}$: μέση θλιπτική τάση

Θέτοντας $w = E_p$ προκύπτει η έκφραση του plateau stress ή μέση θλιπτική τάση:

$$\bar{\sigma_s} = \frac{\sigma y \cdot \left(\frac{t}{L}\right)^2 \cdot 8\vartheta_0}{16\left(\frac{h}{L} - \cos\theta_0\right) \cdot \left(\sin\theta_0 - \frac{2t}{L}\right)} \tag{5.3.9}$$

5.3.5 Υπολογισμός μέσης δυναμικής τάσης (re-entrant)

Σε συνθήκες δυναμικής φόρτισης, όπου η θλιπτική ταχύτητα είναι υψηλή, η μηχανική απόκριση των κυψελωτών αυξητικών δομών διαφοροποιείται σημαντικά από την αντίστοιχη θλιπτική (quasi-static) περίπτωση. Ενώ στη χαμηλή ταχύτητα θλίψη η μέση τάση plateau ($\bar{\sigma_s}$) προκύπτει αποκλειστικά από την ισορροπία μεταξύ εξωτερικού έργου και απορροφούμενης πλαστικής ενέργειας στα τοιχώματα, στην περίπτωση υψηλής ταχύτητας πρέπει να ληφθεί υπόψη και η συμβολή της κινητικής ενέργειας και της αδρανειακής αντίστασης των τοιχωμάτων. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως δυναμική ενίσχυση της plateau stress (dynamic strengthening).

Στο ερευνητικό άρθρο των Hu κ.ά. [77] για την περιγραφή του προβλήματος χρησιμοποιείται η θεωρητική προσέγγιση χρησιμοποιώντας το θεώρημα της γραμμικής ορμής:

$$\Delta p = F \cdot \Delta t$$

(5.3.10)

Όπου Δ_p είναι η μεταβολή της ορμής των τοιχωμάτων κατά την διάρκεια της σύνθλιψης, και F η εφαρμοζόμενη δύναμη. Κατά την διάρκεια του κύκλου συμπίεσης διάρκειας T=H/u (όπου H το ύψος σύνθλιψης του κελιού μέχρι την πυκνοποίηση και u η ταχύτητα πρόσκρουσης), τα τοιχώματα του κυττάρου υφίστανται μεταβολές ταχύτητες. Στην αρχή της παραμόρφωσης μόνο τα ανώτερα τοιχώματα κινούνται με την ταχύτητα πρόσκρουσης u, ενώ τα υπόλοιπα παραμένουν σχεδόν ακίνητα. Καθώς εξελίσσεται η θλίψη, οι λοξοί και οριζόντιοι κλάδοι επιταχύνονται και στο τέλος του κύκλου όλα τα τοιχώματα έχουν αποκτήσει την ίδια ταχύτητα. Η μεταβολή της ορμής τους προκαλεί μια επιπλέον απαίτηση σε εξωτερική δύναμη, η οποία εκδηλώνεται ως αύξηση της μέσης θλιπτικής τάσης.

Η συνολική μέση δυναμική τάση υπό υψηλή ταχύτητα θλίψης ($\overline{\sigma_d}$) προκύπτει ως άθροισμα δύο όρων:

- Της μέσης θλιπτικής τάσης ($\bar{\sigma}_S$)
- Ενός πρόσθετου όρου που εκφράζει την αδρανειακή αντίσταση των τοιχωμάτων.

Η τελική έκφραση δίνεται από τη σχέση:

$$\bar{\sigma}_d = \bar{\sigma}_s + \frac{\rho_s \cdot u^2 \cdot \left(\frac{h}{l} + 2\right) \cdot \frac{t}{l}}{4 \cdot \left(\sin\theta_0 - \frac{2t}{l}\right) \cdot \left(\frac{h}{l} - \cos\theta_0\right)}$$

(5.3.11)

Όπου:

- ρ_s: πυκνότητα υλικού τοιχωμάτων
- u: ταχύτητα θλίψης

Η παραπάνω σχέση δείχνει ότι το plateau stress αυξάνεται με το τετράγωνο της ταχύτητας θλίψης, λόγω του όρου ($\rho_s u^2$). Η ενίσχυση αυτή είναι πιο έντονη σε γεωμετρίες με λεπτά και μακριά τοιχώματα, καθώς και για μικρές τιμές γωνίας θ_0. Για το ποσοτικό χαρακτηρισμό της επίδρασης εισάγεται ο δείκτης δυναμικής ευαισθησίας (ids), ο οποίος αυξάνει με τον λόγο h/l, ενώ μειώνεται με την αύξηση της γωνίας θ_0 ή του λόγου t/l.

$$I_{\mathrm{d}s} = \frac{\psi}{\phi} \Rightarrow I_{\mathrm{d}s} = \frac{\frac{h}{L} + 2}{2\vartheta_0 \cdot \frac{t}{l}}$$

(5.3.13)

Συνεπώς οι δομές με ψηλά και λεπτά κελιά είναι περισσότερο ευαίσθητες σε δυναμικές φορτίσεις, ενώ οι δομές με μεγαλύτερο πάχος τοιχωμάτων ή μεγαλύτερη γωνία εμφανίζουν μικρότερη εξάρτηση από την ταχύτητα πρόσκρουσης. Επιπλέον, χρησιμοποιώντας τη σχέση Gibson and Ashby για την σχετική πυκνότητα που αναφέρθηκε παραπάνω, συμπεραίνεται ότι το Ids μειώνεται όταν αυξάνεται η πυκνότητα ή η γωνία των τοιχωμάτων.

Τα συμπεράσματα είναι ότι η μέση δυναμική τάση υπό υψηλή ταχύτητα θλίψης δεν αποτελεί σταθερό μέγεθος αλλά εξαρτάται από τη γεωμετρία της κυψελοειδούς δομής όσο και από την δυναμική συνθήκη φόρτισης. Ακόμα ο δείκτης ids δίνει ένα μέτρο για το πόσο έντονα επηρεάζεται η συμπεριφορά από την δυναμική φόρτιση.

5.3.6 Υπολογισμός μέτρου διάτμησης (re-entrant)

Η εκτίμηση του διατμιτικού μέτρου ελαστικότητας G σε αναδιπλούμενες δομές re-entrant προϋποθέτει την ανάλυση των μηχανισμών παραμόρφωσης που ενεργοποιούνται υπό διατμητική φόρτιση. Σύμφωνα με το θεωρητικό πλαίσιο των [76], η απόκριση της κυψέλης μπορεί να περιγράφει μέσω τριών βασικών μηχανισμών:

- Κάμψη των τοιχωμάτων
- Εφελκυσμό, θλίψη των στοιχείων

- Άρθρωση στις συνδέσεις των κελιών

Η μεθοδολογία βασίζεται στον ορισμό σταθερών δυνάμεων, οι οποίες συνδέουν την εφαρμοζόμενη δύναμη με την αντίστοιχη μετατόπιση του τοιχώματος. Ο γενικός τύπος είναι:

$$F = K \cdot \delta \tag{5.3.14}$$

Όπου F η εφαρμοζόμενη δύναμη, K η σταθερά δύναμης και δ η μετατόπιση. Η διατμητική παραμόρφωση υπολογίζεται θεωρώντας ότι η μονάδα του κελιού παραμορφώνεται υπό απλή διάτμηση, με αποτέλεσμα να ορίζεται η διατμητική τάση ως:

$$G = \frac{\tau}{\gamma} \tag{5.3.15}$$

Όπου τ είναι η διατμητική τάση και γ η διατμητική παραμόρφωση. το διατμητικό μέτρο προκύπτει ως:

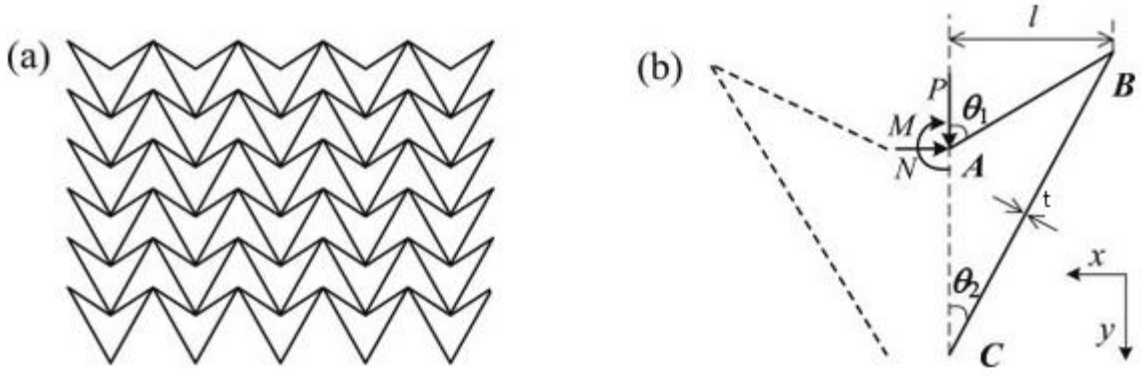
$$G = \frac{k_s \cos\theta (h + l\sin\theta)}{h(\cos^2\theta + (h + l\sin\theta)\cdot\sin\theta)^2} \tag{5.3.16}$$

Όπου k_s είναι η σταθερά εφελκυσμού:

$$k_s = \frac{E_s b t}{l} \tag{5.3.17}$$

5.4 Ανάλυσης δομής Arrowhead

Η συμμετρική ως προς τον κατακόρυφο άξονα, μονάδα τύπου double arrowhead (DAA/DAA), αποτελείται από τέσσερις λοξές δοκούς, οι οποίες αρθρώνονται στα σημεία A,B,C όπως φαίνεται στο σχήμα 5.4.1.



Σχήμα 5.4.1 *a) Σύστημα κυψελών b) Μονάδα κυψέλης- unit sell. [78]*

Ως ανεξάρτητες γεωμετρικές παράμετροι λαμβάνονται:

- θ1: η γωνία της 'κοντής' δοκού με τον κατακόρυφο άξονα
- θ2: η γωνία της 'μακριάς' δοκού με τον κατακόρυφο άξονα
- l: η οριζόντια προβολή μεταξύ των κατακόρυφων A και B.
- t: πάχος εντός επιπέδου
- b: πλάτος εκτός επιπέδου

Από απλή τριγωνομετρία της μονάδας που απεικονίζεται στο σχήμα 5.4.1 (b), προκύπτουν τα εξής μήκη δοκών όπως χρησιμοποιούνται και στο παράρτημα των Qiao & Chen [78]:

$$l_1 = \frac{l}{\sin\theta_1} \tag{5.4.1}$$

Και

$$l_2 = \frac{l}{\sin\theta_2} \tag{5.4.2}$$

Το κατακόρυφο ύψος της κυψέλης Η είναι:

$$H = l(\cos\theta_1 + \cos\theta_2) \tag{5.4.3}$$

5.4.1 Υπολογισμός λόγου Poisson (arrowhead)

Η δομή τύπου double-arrowhead (DAH/DAA) χαρακτηρίζεται από την ιδιότητα να εμφανίζει αρνητικό λόγο Poisson, καθώς η γεωμετρία της με δοκούς τοποθετημένους υπό γωνίες θ1 και θ2 ως προς τον κατακόρυφο άξονα, επιτρέπει την ανάπτυξη μηχανισμού εγκάρσιας διεύρυνσης όταν η δομή συμπιέζεται στον άξονα y.

Από την κινηματική των λοξών δοκών που αναφέρεται στο άρθρο των Zhao κ.ά. [79] προκύπτει η αναλυτική μορφή του λόγου Poisson:

$$v_{xy} = -\frac{\cos\theta_1 \cos\theta_2}{\sin\theta_1 \ \sin\theta_2} \tag{5.4.4}$$

Η αναλυτική έκφραση του λόγου Poisson για την δομή δείχνει ότι η τιμή εξαρτάται αποκλειστικά από τις γωνίες θ_1,θ_2 τον λοξών δοκών. Στην περιοχή μεταξύ $0 < \theta_1 < \theta_2 < 90$, ο λόγος Poisson είναι πάντοτε αρνητικός γεγονός που επιβεβαιώνει τον αυξητικό χαρακτήρα της γεωμετρίας. Υπό κατακόρυφη θλίψη, η παραμόρφωση οδηγεί σε εγκάρσια διαστολή, η οποία είναι εντονότερη όσο μικρότερες είναι οι γωνίες. Κατά συνέπεια, η επιλογή των γωνιών αποτελεί το εργαλείο σχεδιασμού για τον έλεγχο της αυξητικής συμπεριφορά.

5.4.2 Υπολογισμός σχετικής πυκνότητας (arrowhead)

Η σχετική πυκνότητα της DAH/DAA αναδεικνύεται ως κατ' εξοχήν γεωμετρικός παράγοντας και εξαρτάται μόνο από τις γωνίες θ_1,θ_2, το μήκος των λοξών πλευρών και το πάχος. Ο τύπος για τον υπολογισμό της πυκνότητας σύμφωνα με τα άρθρα των Qiao & Chen [78], Zhao κ.ά. [79] είναι:

$$\rho = \frac{t(\sin\theta_1 + \sin\theta_2)}{l \cdot \sin(\theta_1 - \theta_2)} \tag{5.4.5}$$

Συμπεραίνεται ότι η σχετική πυκνότητα είναι αδιάστατη και ελέγχεται αποκλειστικά από τον λόγο λεπτής δοκού (t/l) και από τις γωνίες των δύο δοκών. Γραμμικά αυξάνεται με το t/l, ενώ για σταθερό t/l αυξάνεται όσο μειώνεται η γωνιακή απόσταση θ_1-θ_2 (πιο κλειστό βέλος). Ο αριθμητής ($\sin\theta_1$+$\sin\theta_2$) δείχνει συμμετρική συνεισφορά των δύο δεσμών, ενώ ο παρονομαστής sin (θ_1-θ_2) εκφράζει την πυκνότητα τομών μεταξύ τους δηλαδή το ποσό πυκνά είναι οι δύο δεσμοί στην κυψέλη.

5.4.3 Υπολογισμός μέτρου ελαστικότητας (arrowhead)

Στην δομή DAH/DAA, οι λοξές δοκοί με γωνίες θ_1,θ_2 ως προς τον κατακόρυφο άξονα και οριζόντιο βήμα l καθορίζουν πλήρως την κατακόρυφη ελαστική απόκριση. Για ομοιόμορφη κατακόρυφη τάση σ_∞ εφαρμόζεται δύναμη $2P_A = 2\sigma_\infty \cdot l \cdot b$ σε μοντέλο μισού κελιού με κατάλληλους περιορισμούς στο Α και πάκτωση στο C, οι μακροσκοπικές παραμορφώσεις ορίζονται αυστηρά και οδηγούν στην έκφραση του μέτρου ελαστικότητας Ey. [78]

Χρησιμοποιώντας συντελεστές συμμόρφωσης (μέθοδος μοναδιαίου φορτίου) για τις λοξές δοκούς του μισού κελιού και τις εξισώσεις ισορροπίας προκύπτει:

$$E_y = \frac{3E_s \cdot I}{b \cdot l^3} \cdot a(\theta_1, \theta_2) \tag{5.4.6}$$

Όπου :

- E_s: το μέτρο ελαστικότητας του υλικού των δοκών
- I: η ροπή αδράνειας της δοκού

$$I = \frac{bt^3}{12} \tag{5.4.7}$$

- α: γεωμετρικός παράγοντας

5.4.4 Υπολογισμός μέσης θλιπτικής τάσης (arrowhead)

Η μέση θλιπτική τάση της δομής double-arrowhead υπό μονοαξονική κατακόρυφη θλίψη y εξετάζεται στο άρθρο των Qiao & Chen [78] με μοντέλο μισού κελιού και πλαστικό μηχανισμό τεσσάρων πλαστικών αρθρώσεων στα άκρα των λοξών δοκών AB και BC, όπου μέσω ισοζυγίου έργων:

$$2M_\rho \, \mathrm{d}\vartheta_1 = P_A \, \mathrm{d}u_A^y \tag{5.4.8}$$

Και της κινηματικής σχέσης:

$$\mathrm{d}u_A^y = \frac{\sin(\theta_1 - \theta_2)}{\sin\theta_1 \cos\theta_2} \cdot l \cdot \mathrm{d}\theta_1 \tag{5.4.9}$$

και

$$P_A = \sigma_\infty \cdot l \cdot b \tag{5.4.10}$$

Δίνεται η άνω φραγμένη αντοχή διαρροής :

$$\sigma^{U\rho} = \sigma_\infty = \frac{2M_p \sin\theta_1 \cos\theta_2}{b \cdot l^2 \cdot \sin(\theta_1 - \theta_2)} \tag{5.4.11}$$

Για ορθογωνική διατομή:

$$M_\rho = \frac{b \cdot t^2}{4}\sigma_{ys} \tag{5.4.12}$$

Τελικά προκύπτει:

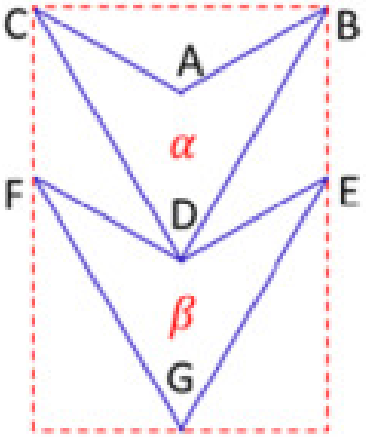
$$\sigma_\rho^u = \sigma_\infty = \frac{\sigma_{ys} \cdot \sin\theta_1 \cdot \cos\theta_2}{2\sin(\vartheta_1 - \theta_2)} \cdot \left(\frac{t}{L}\right)^2 \tag{5.4.13}$$

Χρησιμοποιώντας την σχέση της σχετικής πυκνότητας, η μέση θλιπτική τάση γράφεται:

$$\sigma_s = \frac{\sigma_{ys} \cdot \sin\theta_1 \cdot \cos\theta_2 \cdot \sin(\theta_1 - \theta_2)}{2(\sin\theta_1 + \sin\theta_2)^2} \cdot \rho^2 \tag{5.4.14}$$

5.4.5 Υπολογισμός μέσης δυναμικής τάσης (arrowhead)

Η δυναμική τάση ορίζεται ως η μέση τάση plateau κατά την προοδευτική σύνθλιψη και προκύπτει ως επέκταση της quasi static θλιπτικής αντοχής σ_s με πρόσθετο αδρανειακό όρο. Στην εργασία των Zhao κ.ά. [79], μελετάται το μοντέλο βασιζόμενο σε ζώνη επαναλαμβανόμενης σύνθλιψης και σε ισοζύγιο ορμής σε αντιπροσωπευτικό μπλοκ δύο κυψελών (α, β) όπως φαίνεται στο σχήμα 5.4.5.1.



Σχήμα 5.4.5.1 *Αντιπροσωπευτικό μπλοκ. [79]*

Στην κινηματική ζώνη σύνθλιψης η επαναλαμβανόμενη κατάρρευση μειώνει το ύψος του μπλοκ κατά:

$$\Delta H = \frac{\sin(\theta_1 - \theta_2)}{\sin\theta_1 \cdot \sin\theta_2} l = (t_2 - t_1) \cdot u \tag{5.4.15}$$

Όπου u η ταχύτητα πρόσκρουσης. Η μεταβολή της ορμής από τη διαμόρφωση της ζώνης προκύπτει:

$$\Delta p = M_a \cdot u = 2p_s tlb \frac{\sin\theta_1 + \sin\theta_2}{\sin\theta_1 \cdot \sin\theta_2} u \tag{5.4.16}$$

Με (M_a) τη μάζα της μίας κυψέλης και b το εκτός επιπέδου πλάτος. Το ισοζύγιο ορμής δίνει:

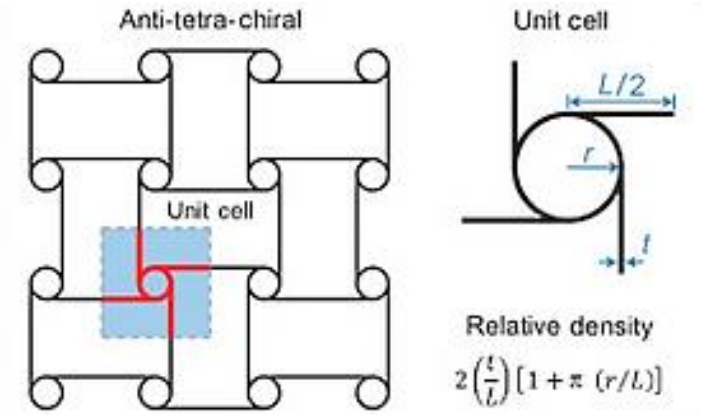
$$\Delta_\rho = 2lb \int_{t_1}^{t_2} (\sigma_H - \sigma_2)\, \mathrm{d}t \tag{5.4.17}$$

Συνδυάζοντας τις σχέσεις (5.4.15-16-17), το θεωρητικό μοντέλο δείχνει ότι η δυναμική θλιπτική αντοχή εξαρτάται μόνο από τη σχετική πυκνότητα ρ, την ταχύτητα πρόσκρουσης u και την πυκνότητα του συμπαγούς υλικού ρ_s καταλήγοντας στην σχέση:

$$\sigma_H = \sigma_d = \sigma_s + \rho_s \cdot \rho \cdot u^2 \tag{5.4.18}$$

5.5 Ανάλυση δομής anti-tetra chiral

Η δομή anti-tetra chiral ανήκει στην ευρύτερη κατηγορία των chiral αυξητικών δομών και χαρακτηρίζεται από την ιδιαίτερη γεωμετρική τοπολογία, η οποία αποτελεί τη βασική αιτία εμφάνισης αρνητικού λόγου Poisson. Η κυψέλη της δομής έχει τετραπλή συμμετρία και αποτελείται από κυκλικούς δακτύλιους (ή κόμβους) που διατάσσονται περιοδικά και συνδέονται μεταξύ τους μέσω ευθύγραμμων ελασμάτων τοποθετημένων εφαπτομενικά όπως φαίνεται στο σχήμα 5.5.1. [80], [81]



Σχήμα 5.5.1 *Σχηματική απεικόνιση συστήματος κυψελών και μονάδας κυψέλης-unit sell [81]*

Η διάταξη αυτή, οδηγεί σε έναν χαρακτηριστικό μηχανισμό παραμόρφωσης όπου οι δακτύλιοι περιστρέφονται και τα ελάσματα κάμπτονται, παράγοντας έτσι την επιθυμητή αυξητική συμπεριφορά. Τα βασικά γεωμετρικά μεγέθη που ορίζουν την δομή είναι:

- r: η ακτίνα των δακτυλίων
- L: το μήκος των ελασμάτων
- T: το πάχος των ελασμάτων
- b: το πάχος εκτός επιπέδου
- και η απόσταση μεταξύ των κέντρων γειτονικών δακτυλίων

Από αυτά τα μεγέθη προκύπτουν αδιάστατες παράμετροι, όπως ο λόγος ακτίνας προς μήκος ελάσματος εξίσωση 5.5.1, και πάχους ελάσματος προς μήκος ελάσματος εξίσωση 5.5.2.

$$x = \frac{r}{L} \tag{5.5.1}$$

Και

$$\tau = \frac{t}{L} \tag{5.5.2}$$

Οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την παραμετρική περιγραφή της γεωμετρίας και κατ' επέκταση την κινηματική συμπεριφορά της δομής. Μεταβολές στις γεωμετρικές αναλογίες επηρεάζουν άμεσα το εύρος περιστροφής των δακτυλίων, την κάμψη των ελασμάτων και τελικά τον τρόπο με τον οποίο η δομή ανταποκρίνεται σε εφελκυστικά ή θλιπτικά φορτία. [82]

Η συμπεριφορά της anti-tetra chiral δομής δεν είναι ισότροπη, αλλά εμφανίζει ανισοτροπία στο επίπεδο. Αυτό σημαίνει ότι οι μηχανικές αποκρίσεις (όπως ακαμψία ή λόγος Poisson) διαφοροποιούνται ανάλογα με την διεύθυνση φόρτισης. Επιπλέον, ο συνδυασμός τετραπλής συμμετρίας και τοπικής περιστροφικής κινηματικής προσδίδει στη δομή δυνατότητα μεγάλης πλευρικής παραμόρφωσης σε σύγκριση με συμβατικά κυψελωτά υλικά ίδιας πυκνότητας.

Για την πληρέστερη περιγραφή της γεωμετρίας χρήσιμο είναι να εισαχθεί η γωνία χιλαρικότητας:

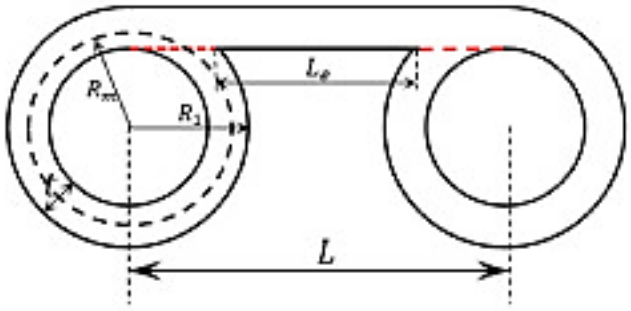
$$\theta = \arctan\left(\frac{2r}{L}\right) \tag{5.5.3}$$

Η οποία εκφράζει τον βαθμό κλίσης των συνδέσμων ως προς την ευθεία που ενώνει τα κέντρα των δακτυλίων. Αυτό σημαίνει ότι αν η ακτίνα είναι πολύ μικρή σε σχέση με το μήκος της ευθείας του ελάσματος η δομή συμπεριφέρεται πιο συμβατικά, εφόσον οι δακτύλιοι περιστρέφονται λιγότερο. Επιπλέον η σύνδεση ελάσματος με τον δακτύλιο δημιουργεί επικάλυψη μιας μικρής ζώνης στο άκρο που δεν κάμπτεται ελεύθερα, γι' αυτό ορίζεται το ενεργό μήκος ελάσματος:

$$l_e = L - 2\sqrt{2R_1 t - t^2}$$

(5.5.4)

Ουσιαστικά, κάθε έλασμα (σύνδεσμος που ενώνει δύο δακτυλίους) είναι ενσωματωμένο εφαπτομενικά πάνω στον δακτύλιο. Συνεπώς το πραγματικό μήκος που μπορεί να κάμπτεται ελεύθερα δεν είναι όλο το γεωμετρικό μήκος L, αλλά μικρότερο που ονομάζεται ενεργό μήκος L_e. [82]



Σχήμα 5.5.2 *Δομή συστήματος προφυλακτήρα.[82]*

Σε πρακτικό επίπεδο σχεδιασμού, η επιλογή των γεωμετρικών παραμέτρων πρέπει να διασφαλίσει ότι τα ελάσματα δεν αλληλεπικαλύπτονται με τους δακτυλίους και παραμένουν ελεύθερα να λειτουργούν καμπτικά. Αυτός ο περιορισμός θέτει όρια στο μέγιστο μέγεθος της ακτίνας r σε σχέση με το μήκος και το πάχος των ελασμάτων.

Συνοψίζοντας, η anti-tera chiral δομή ορίζεται από λίγες αλλά κρίσιμες γεωμετρικές παραμέτρους, οι οποίες επηρεάζουν άμεσα τον μηχανισμό παραμόρφωσης και τις μακροσκοπικές, μηχανικές ιδιότητες. Η ανάλυση των χαρακτηριστικών αυτών αποτελεί απαραίτητη εισαγωγή πριν την ανάπτυξη των μαθηματικών σχέσεων.

5.5.1 Υπολογισμός λόγου Poisson (anti-tetra chiral)

Η εμφάνιση του αρνητικού λόγου Poisson στη συγκεκριμένη δομή οφείλεται αποκλειστικά στον κινηματικό μηχανισμό παραμόρφωσης που επιβάλλει η γεωμετρία της. Υπό αξονική φόρτιση, οι δακτύλιοι περιστρέφονται, ενώ τα ελάσματα λειτουργούν κυρίως καμπτικά. Η περιστροφή των δακτυλίων προκαλεί μετατόπιση των σημείων έδρασης των ελασμάτων, με αποτέλεσμα η συνολική κυψελίδα να εμφανίζει πλευρική διαστολή αντί για συρρίκνωση και έτσι προκύπτει η αυξητικότητα από τον συνδυασμό περιστροφής και κάμψης. [80], [81]

Η τιμή του λόγου Poisson εξαρτάται άμεσα από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της δομής. Συγκεκριμένα, η ακτίνα των δακτυλίων (r), το μήκος των ελασμάτων (L) και το πάχος τους (t) καθορίζουν τον βαθμό περιστροφής που μπορεί να αναπτυχθεί. Στην βιβλιογραφία προκύπτει κλειστή μαθηματική έκφραση για την περίπτωση ισομηκών ελασμάτων:

$$v_{xy} = -\frac{6\left(\frac{r}{L}\right)^2}{6\left(\frac{r}{L}\right)^2 + \left(\frac{t}{L}\right)^2}$$

(5.5.5)

Η οποία δείχνει ότι η αυξητική συμπεριφορά ενισχύεται όταν ο λόγος (r/L) μεγαλώνει ενώ μειώνεται όταν το πάχος t γίνεται σχετικά μεγάλο. Η εξίσωση αυτή επιβεβαιώνεται πειραματικά, καθώς δοκίμια με μεγαλύτερους δακτυλίους παρουσιάζουν πιο έντονη πλευρική διαστολή υπό εφελκυσμό. [80]

Ένα ακόμη χαρακτηριστικό της anti-tetra chiral δομής είναι ότι ο λόγος Poisson δεν είναι ισοτροπικός. Λόγω της τετραπλής συμμετρίας της κυψέλης, η αυξητικότητα εκδηλώνεται στις κύριες διευθύνσεις της διάταξης (x και y), ενώ σε ενδιάμεσες διευθύνσεις η συμπεριφορά διαφοροποιείται. Αυτό σημαίνει ότι για την

πλήρη περιγραφή απαιτείται η μελέτη του λόγου Poisson αλλά και των συζευγμένων μηχανισμών παραμόρφωσης που απορρέουν από την ανισοτροπία.

5.5.2 Υπολογισμός σχετικής πυκνότητας (anti-tetra chiral)

Στην anti-tetra chiral δομή, η σχετική πυκνότητα εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κυψέλης και συγκεκριμένα την ακτίνα των δακτυλίων, το μήκος και το πάχος των ελασμάτων, καθώς και την διάταξη τους στο τετραγωνικό πλέγμα. Οι δακτύλιοι προσθέτουν υλικό κυρίως στην περιφέρεια ενώ τα ελάσματα συνεισφέρουν μέσω του μήκους και του πάχους τους. Η αναλογία αυτών των μεγεθών καθορίζει τη συνολική υλική συμμετοχή της κυψέλης.

Η βιβλιογραφία παρέχει αναλυτική μαθηματική έκφραση για τη σχετική πυκνότητα, η οποία λαμβάνει υπόψη το συνδυασμένο εμβαδόν των δακτύλων και των ελασμάτων σε σχέση με την επιφάνεια της κυψέλης:

$$\rho_\tau = \frac{\rho}{\rho_s} = \frac{\pi(R_1 + r_1) \cdot t + 2Lt}{L^2} \tag{5.5.6}$$

Όπου R_1 και r_1 είναι εξωτερικές και εσωτερικές ακτίνες των δακτυλίων, t το πάχος των ελασμάτων και L το μήκος της πλευράς της τετραγωνικής κυψέλης. Η ακαμψία και η αντοχή της δομής αυξάνονται με την πυκνότητα αλλά η αυξητική συμπεριφορά μπορεί να μειωθεί, καθώς περιορίζεται η δυνατότητα περιστροφής και κάμψης ελασμάτων. [82]

5.5.3 Υπολογισμός μέτρου ελαστικότητας (anti-tetra chiral)

Το μέτρο ελαστικότητας της anti-tetra chiral δομής εκφράζει τη δυσκαμψία της κυψέλης στη διεύθυνση φόρτισης και συνδέεται άμεσα με τη γεωμετρική αρχιτεκτονική της. Για την περίπτωση ισομηκών ελασμάτων η βιβλιογραφία δίνει την ακόλουθη αναλυτική σχέση για τη δυσκαμψία κατά την διεύθυνση x:

$$\frac{E_x}{E_s} = \frac{\frac{t}{L}}{\frac{1 + 6\left(\frac{r}{L}\right)^2}{\left(\frac{t}{L}\right)^2}} \tag{5.5.7}$$

Όπου E_x είναι το μέτρο ελαστικότητας της δομής στη διεύθυνση x, E_s το μέτρο ελαστικότητας του συμπαγούς υλικού, t το πάχος των ελασμάτων, L το μήκος της πλευράς της κυψέλης και r η ακτίνα των δακτυλίων.[80]

Η μορφή της εξίσωσης αποκαλύπτει τη σαφή εξάρτηση της δυσκαμψίας από τους αδιάστατους λόγους t/L και r/L:

- Αύξηση του λόγου t/L: ο αριθμητής μεγαλώνει και το κλάσμα αυξάνει γεγονός που σημαίνει ότι η δομή γίνεται πιο άκαμπτη όταν τα ελάσματα είναι παχύτερα.
- Αύξηση του λόγου r/L: δείχνει ότι μεγαλύτεροι δακτύλιοι οδηγούν σε μικρότερο μέτρο ελαστικότητας .

Στο άρθρο των [82], δίνεται διαφορετική σχέση, χρησιμοποιώντας την θεωρεία δοκών Euler-Bernoulli, οπού λαμβάνει υπόψη μεγέθη όπως η ροπή αδράνειας I, το πάχος εκτός επιπέδου b και το ενεργό μήκος L_e και την μέση ακτίνα R_m του δακτυλίου, όπως φαίνεται στην εξίσωση 5.5.8:

$$E = \frac{2E_s I}{bL_e R_m^2} \tag{5.5.8}$$

Παρά την διαφορετική τους μορφή, οι δυο εξισώσεις δεν αναιρούν η μια την άλλη. Η πρώτη εξίσωση αποτελεί μια ‘κανονικοποιημένη’ παραλλαγή που διευκολύνει τις παραμετρικές μελέτες και την αποτύπωση τάσεων, ενώ η δεύτερη συνδέεται άμεσα με μεγέθη όπως ροπή αδρανείας και ενεργό μήκος και παρέχει πιο ακριβείς προβλέψεις για εφαρμογές σχεδιασμού.

5.5.4 Υπολογισμός μέσης θλιπτικής τάσης (anti-tetra chiral)

Η plateau stress ορίζεται όπως αναλύεται και στα προηγούμενα κεφάλαια ως μέσος όρος της ονομαστικής τάσης από την αρχική διαρροή μέχρι την πυκνοποίηση. Στις καμπύλες αυτό αντιστοιχεί στη δεύτερη περιοχή μεταξύ της αρχικής γραμμικής ελαστικής απόκρισης και της απότομης αύξησης λόγω πυκνοποίησης. Για χαμηλές ταχύτητες η φόρτιση αντιμετωπίζεται ως στατική.

Στο ερευνητικό άρθρο των Kai κ.ά. [82], επιλέγεται μια κυψέλη στην κεντρική ζώνη του δοκιμίου ώστε να ελαχιστοποιηθεί η επίδραση ορίων και λοξών διατμητικών ζωνών. Η in-plane θλίψη περιγράφεται από συνδυασμό περιστροφής των κυκλικών κόμβων και πλαστικών αρθρώσεων στα ελάσματα. Η καθ' ύψος μετατόπιση της κυψέλης μέχρι την πυκνοποίηση γράφεται γεωμετρικά ως:

$$u_z = L - L\cos\theta_0 + 2r\sin\theta_0 \tag{5.5.9}$$

Όπου θ_0 είναι η γωνία περιστροφής των πλαστικών αρθρώσεων που αντιστοιχεί στην κατάσταση πυκνοποίησης. Η θ_0 προκύπτει από συνθήκη γεωμετρικής συμβατότητας, δηλαδή όταν οι γειτονικοί δακτύλιοι έρχονται τόσο κοντά, ώστε να μην υπάρχει άλλη ελεύθερη κίνηση. Αυτό περιγράφεται από μια οριζόντια απόσταση T_x που είναι η πραγματική απόσταση ανάμεσα στα κέντρα των δακτυλίων στην πλήρη πυκνοποίηση. Συνεπώς η x σχέση που δίνει το θ_0 είναι:

$$L - L\cos\theta_0 + 2r\sin\theta_0 = T_x \tag{5.5.10}$$

Στην συνέχεια με βάση την αρχή της ενεργειακής ισορροπίας, δηλαδή την εξίσωση του εξωτερικού έργου που παράγεται από την εφαρμοζόμενη φόρτιση με την εσωτερική πλαστική ενέργεια που απορροφάται από τις πλαστικές αρθρώσεις των ελασμάτων, γίνεται η θεωρητική προσέγγιση για τον υπολογισμό της quasi-static plateau stress.

Συγκεκριμένα το εξωτερικό έργο που παράγεται κατά την διάρκεια της φόρτισης εκφράζεται ως:

$$W_{ext} = \sigma_1(bL)\cdot u_z \tag{5.5.11}$$

Όπου σ_1 είναι το plateau stress στο φωτιζόμενο άκρο, b το πάχος εκτός επιπέδου της δομής, L το πλάτος της κυψέλης και u_z η κατακόρυφη μετατόπιση μέχρι την τελική παραμόρφωση. αντίστοιχα, η εσωτερική πλαστική ενέργεια απορροφάται μέσω των πλαστικών αρθρώσεων που σχηματίζονται στα ελάσματα. Η συνολική στροφή μέχρι την πυκνοποίηση εκφράζεται ως:

$$\Delta\theta_0 = 8\theta_0 \tag{5.5.12}$$

Ενώ η πλαστική ροπή ορθογωνικής διατομής δίνεται από την σχέση:

$$M_\rho = \frac{\sigma_{ys}\cdot b\cdot t^2}{4} \tag{5.5.13}$$

Με σ_{ys} το όριο διαρροής του υλικού και t το πάχος των ελασμάτων. Συνεπώς, η ενέργεια που απορροφάει ισούται με:

$$w_{int} = M_\rho\Delta\theta_0 = 8M_\rho\theta_0 \tag{5.5.14}$$

Θέτοντας $W_{ext} = W_{int}$ και λύνοντας ως προς την σ_1, προκύπτει η αναλυτική έκφραση της μέσης θλιπτικής τάσης (quai static plateau stress) για την anti-tetra chiral δομή:

$$\overline{\sigma_1} = \frac{t^2\cdot\sigma_{ys}\cdot\theta_0}{L(L - L\cos\theta_0 + 2r\cdot\sin\theta_0)} \tag{5.5.15}$$

Η παραπάνω σχέση είναι ισχυρά εξαρτημένη από τις γεωμετρικές παραμέτρους της κυψέλης (t,L,r) και από την γωνία περιστροφής θ_0. Το πάχος των ελασμάτων ενισχύει την θλιπτική αντοχή με την αύξησή του, ενώ η αύξηση της ακτίνας r τείνει να μειώνει τη μέση θλιπτική τάση καθώς επιτρέπει μεγαλύτερη περιστροφή και συνεπώς μεγαλύτερη μετατόπιση u_z.

Επιπλέον, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι στο καθεστώς χαμηλής ταχύτητας η παραμόρφωση καταμένεται ομοιόμορφα και υπάρχει ισορροπία, συνεπώς ισχύει ότι η μέση τάση που μετριέται στο φορτιζόμενο άκρο όπου εφαρμόζεται η πρόσκρουση είναι ίση με την μέση τάση στο στηριζόμενο άκρο δηλαδή την απέναντί πλευρά της δομής και ισχύει:

$$\sigma_1 = \sigma_2 \tag{5.5.16}$$

Γι' αυτό η σχέση 5.5.1.6 αντιπροσωπεύει την συνολική μέση θλιπτική τάση της δομής.

5.5.5 Υπολογισμός μέσης δυναμικής τάσης (anti-tetra chiral)

Η συμπεριφορά της anti-tetra chiral δομής υπό υψηλής ταχύτητας πρόσκρουση διαφοροποιείται σημαντικά από την quasi-static περίπτωση. Σε αυτή την κατάσταση, η κατανομή των τάσεων δεν είναι πλέον ομοιόμορφη, καθώς η παραμόρφωση διαδίδεται μέσω ενός μετώπου (shock front) που ταξιδεύει κατά μήκος της δομής. Ως αποτέλεσμα, η μέση δυναμική τάση (σ_d) δεν ισούται με την quasi-static plateau stress (σ_s ή σ_1), αλλά αυξάνεται λόγω των αδρανειακών φαινομένων και της κυματικής διάδοσης παραμόρφωσης. [82]

Η μετάβαση από quasi-static σε δυναμικό καθεστώς καθορίζεται από την ταχύτητα (steady shock) u_s, η οποία εκφράζεται ως:

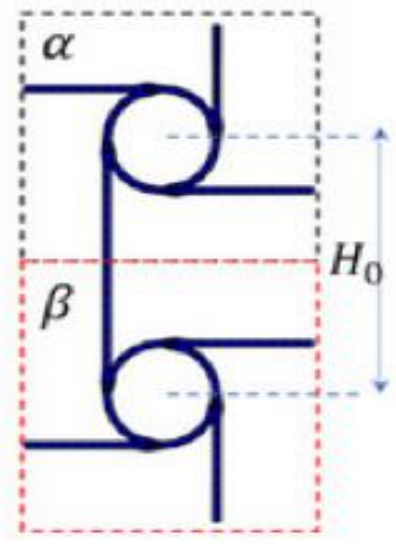
$$U_S = \sqrt{\frac{2\sigma_0 \varepsilon_d}{\rho}} \tag{5.5.17}$$

Όπου σ_0 είναι η quasi-static θλιπτική αντοχή, ε_d η παραμόρφωση πυκνοποίησης και ρ η πυκνότητα του υλικού. Για ταχύτητες πρόσκρουσης μικρότερες της ταχύτητας steady shock ($u < u_z$), η παραμόρφωση κατανέμεται σχετικά ομοιόμορφα. Για ταχύτητες μεγαλύτερες του steady shock ($u > u_z$) η παραμόρφωση δεν είναι ομοιόμορφη και χαρακτηρίζεται shock type καθεστώς όπου ισχύει η σχέση [5.5.18].

$$\sigma_1 > \sigma_2 \tag{5.5.18}$$

Δηλαδή η τάση στο φορτιζόμενο άκρο είναι μεγαλύτερη από αυτήν στο στηριζόμενο, λόγω αδρανειακών φαινομένων και της χρονικής καθυστέρησης που οφείλεται στην γρήγορη φόρτιση με αποτέλεσμα να μην προλαβαίνει η παραμόρφωση να κατανεμηθεί παντού ταυτόχρονα.

Για να εξαχθεί θεωρητικά η plateau stress στο φωτιζόμενο άκρο, το άρθρο των Kai κ.ά. [82] υιοθετεί ένα αντιπροσωπευτικό μπλοκ δυο γειτονικών κυψελίδων (α, β) σχήμα 4.1.1, και γράφει ισοζύγιο ορμής για το χρονικό διάστημα από την έναρξη της τοπικής αστοχίας t_1 μέχρι την πυκνοποίηση t_2 του μπλοκ.



Σχήμα 5.5.5.1 *Δομή συστήματος προφυλακτήρα.*

Η μεταβολή της ορμής του μπλοκ είναι :

$$\Delta p = \rho_2^a + \rho_2^\beta - \rho_1^a - \rho_1^\beta$$

(5.5.19)

Με $\rho_i^a \rho_i^\beta$ τις ορμές των δύο κυψελών στις χρονικές στιγμές t_i (i=1,2). Από την κινηματική του μετώπου προκύπτουν οι σχέσεις:

$$\rho_2^\beta = \rho_1^a$$

(5.5.20)

Και

$$\rho_1^\beta = O$$

(5.5.21)

Η μεταβολή της ορμής ανά μονάδα πλάτους γράφεται τελικά:

$$\Delta_\rho = \rho_2^a = m \cdot u = 2\rho_s t(\pi r + L)bu$$

(5.5.22)

Όπου m η μάζα του στρώματος (δακτύλιοι + κάθετο έλασμα), ρ_s η πυκνότητα του υλικού και u η ταχύτητα κρούσης. Η ισορροπία ορμής μεταξύ των άκρων δίνει:

$$\int_{t_1}^{t_2} [(\sigma_1 - \sigma_2)bt] = (\sigma_1 - \sigma_2)bL(t_2 - t_1) = \Delta_\rho$$

(5.5.23)

Το χρονικό διάστημα $(t_2 - t_1)$ συνδέεται με την απόσταση που συνθλίβεται το μπλοκ κατά την διάδοση του μετώπου. Η γεωμετρία δίνει:

$$\Delta H = u(t_2 - t_1) = L - r - 4t$$

(5.5.24)

Αντικαθιστώντας τις εξισώσεις (5.5.22–23– 24) και απλοποιώντας, καταλήγει η τελική κλειστή σχέση για τον υπολογισμό της μέσης δυναμικής τάσης :

$$\sigma_1 = \frac{2\rho_s t(\Pi r + L)}{L(L - r - 4t)} u^2 + \sigma_2$$

(5.5.25)

Ο πρώτος όρος είναι καθαρά αδρανειακός, συμπυκνώνει την ενεργό μάζα που στρέφεται σε κίνηση κατά τη διάδοση μετατόπισης και την αποτελεσματική διαδρομή σύνθλιψης. Ο δεύτερος όρος είναι η μέση θλιπτική τάση στο στηριζόμενο άκρο η οποία είναι ίση με την μέση θλιπτική τάση της συνολικής κυψέλης .

5.6 Αποτελέσματα θεωρητικών υπολογισμών

Στις υπό ενότητες αναφέρονται σε μορφή πίνακα τα αποτελέσματα των σχέσεων που αναλύθηκαν παραπάνω για κάθε δομή με της ιδιότητες του υλικού TPU 95A, που θα χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή του απορροφητή.

5.6.1 re-entrant

Λόγος Poisson	$v_y^* = -\frac{\varepsilon x}{\varepsilon y} = \frac{\left(\frac{h}{L} + \sin\theta\right) \cdot \sin\vartheta}{(\cos\theta)^2}$	-1
Σχετική πυκνότητα	$\frac{\rho^*}{\rho_s} = \frac{\frac{t}{l} \cdot \left(\frac{h}{l} + 2\right)}{2 \cdot \sin\theta_0 \cdot \left(\frac{h}{L} - \cos\theta_0\right)}$	0,3079

Μέτρο ελαστικότητας x	$E_1 = E_s \cdot \left(\frac{t}{l}\right)^3 \cdot \frac{\sin\theta}{\left(\frac{h}{L} - \cos\vartheta\right) \cdot \cos^2\theta}$	1,86 MPa
Μέτρο ελαστικότητας y	$E_2 = E_s \cdot \left(\frac{t}{L}\right)^3 \cdot \frac{\left(\frac{h}{L} - \cos\theta\right)}{\sin^3\theta}$	1,39 MPa
Μέση θλιπτική τάση	$\bar{\sigma}_s = \frac{\sigma y \cdot \left(\frac{t}{L}\right)^2 \cdot 8\vartheta_0}{16\left(\frac{h}{L} - \cos\theta_0\right) \cdot \left(\sin\theta_0 - \frac{2t}{L}\right)}$	0,5392 MPa
Μέση δυναμική τάση	$\bar{\sigma}_d = \bar{\sigma}_s + \frac{\rho_s \cdot u^2 \cdot \left(\frac{h}{l} + 2\right) \cdot \frac{t}{l}}{4 \cdot \left(\sin\theta_0 - \frac{2t}{l}\right) \cdot \left(\frac{h}{l} - \cos\theta_0\right)}$	0,5396 MPa
Μέτρο διάτμησης	$G = \frac{k_s \cos\theta(h + l\sin\theta)}{h(\cos^2\theta + (h + l\sin\theta) \cdot \sin\theta)^2}$	1,5926 MPa

Πίνακας 5.6.1.1 *Αποτελέσματα re-entrant.*

5.6.2 Arrowhead

Λόγος Poisson	$v_{xy} = -\frac{\cos\theta_1 \cos\theta_2}{\sin\theta_1 \ \sin\theta_2}$	-1
Σχετική πυκνότητα	$\rho = \frac{t(\sin\theta_1 + \sin\theta_2)}{l \cdot \sin(\theta_1 - \theta_2)}$	0,3252
Μέτρο ελαστικότητας	$E_y = \frac{3E_s \cdot I}{b \cdot l^3} \cdot a(\theta_1, \theta_2)$	0,97 MPa
Μέση θλιπτική τάση	$\sigma_s = \frac{\sigma_{ys} \cdot \sin\theta_1 \cdot \cos\theta_2 \cdot \sin(\theta_1 - \theta_2)}{2(\sin\theta_1 + \sin\theta_2)^2} \cdot \rho^2$	1,4280 MPa
Μέση δυναμική τάση	$\sigma_H = \sigma_d = \sigma_s + \rho_s \cdot \rho \cdot u^2$	1,4284 MPa

Πίνακας 5.6.2.1 *Αποτελέσματα Arrowhead.*

5.6.3 Anti-tetra chiral

Λόγος Poisson	$v_{xy} = -\frac{6\left(\frac{r}{L}\right)^2}{6\left(\frac{r}{L}\right)^2 + \left(\frac{t}{L}\right)^2}$	-0,85
Σχετική πυκνότητα	$\rho_\tau = \frac{\rho}{\rho_s} = \frac{\pi(R_1 + r_1) \cdot t + 2Lt}{L^2}$	0,3596
Μέτρο ελαστικότητας	$\frac{E_x}{E_s} = \frac{\frac{t}{L}}{\frac{1 + 6\left(\frac{r}{L}\right)^2}{\left(\frac{t}{L}\right)^2}}$	11,61 MPa

Μέση θλιπτική τάση	$\bar{\sigma_1} = \frac{t^2 \cdot \sigma_{ys} \cdot \theta_0}{L(L - L\cos\theta_0 + 2r \cdot \sin\theta_0)}$	-
Μέση δυναμική τάση	$\sigma_1 = \frac{2\rho_s t(\Pi r + L)}{L(L - r - 4t)}u^2 + \sigma_2$	-

Πίνακας 5.6.3.1 *Αποτελέσματα anti-tetra chiral.*

Κεφάλαιο 6: Σχεδιασμός και Ομογενοποίηση

6.1 Σχεδιασμός

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω για την παρούσα μελέτη, οι διαστάσεις των δομών που χρησιμοποιήθηκαν δεν καθορίστηκαν αυθαίρετα, αλλά αντλήθηκαν από έτοιμα διαθέσιμα πρότυπα γεωμετρικά μοντέλα με σκοπό την εστίαση στην αξιολόγηση της μηχανικής συμπεριφοράς των διαφορετικών δομών σε σύγκριση με το υλικό του συμβατικού απορροφητή κατά την προσομοίωση χαμηλής ταχύτητας κρούσης.

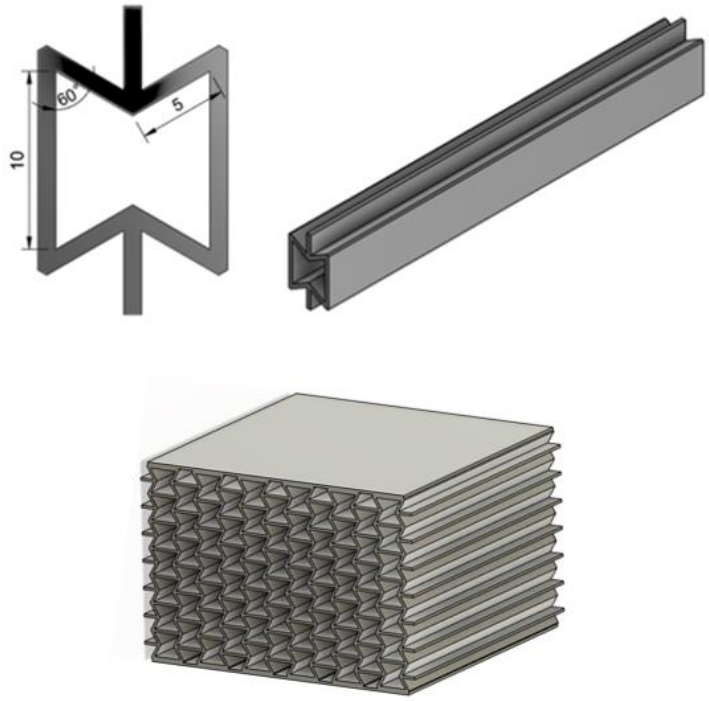
Η τρισδιάστατη μοντελοποίηση των δομών πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του λογισμικού Autodesk Futon 360. Το συγκεκριμένο λογισμικό επιλέχθηκε λόγω της ευρείας εφαρμογής του στον τομέα της μηχανολογικής σχεδίασης, καθώς και των δυνατοτήτων που προσφέρει σε επίπεδο παραμετρικής μοντελοποίησης και γεωμετρικής ακρίβειας.

6.1.1 Σχεδιασμός re-entrant

Η κυψέλη (unit cell) της δομής re-entrant σχεδιάστηκε ως δισδιάστατο σκίτσο και στην συνέχεια επαναλήφθηκε με rectangular pattern ώστε να δημιουργηθεί το δοκίμιο διαστάσεων 100 x 100 x 70 mm. Τα γεωμετρικά μεγέθη της κυψέλης αναφέρονται στον πίνακα 6.1.1.1 καθώς και η απεικόνιση της στο σχήμα 6.1.1.1.

Παράμετρος	Σύμβολο - Μονάδα	Τιμή
Γωνία κυψέλης	Θ (°)	60 ή -30
Μήκος οριζόντιας πλευράς	h (mm)	10
Πάχος τοιχωμάτων	t (mm)	1
Μήκος λοξής πλευράς	l (mm)	5
Πάχος εκτός επιπέδου	b (mm)	100

Πίνακας 6.1.1.1 *Διαστάσεις δομής re-entrant.*



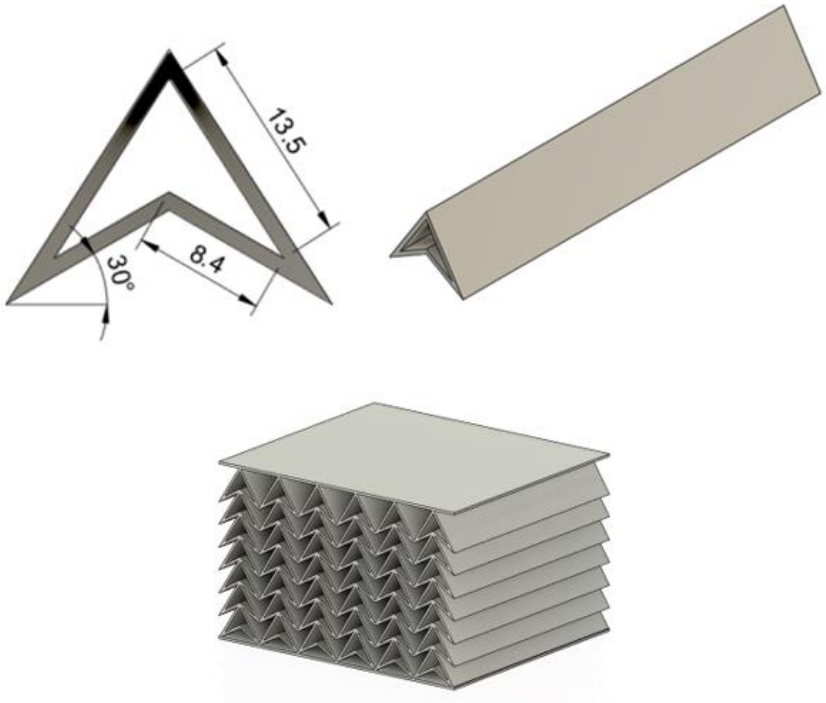
Σχήμα 6.1.1.1 *Unit sell και τελικό δοκίμιο re-entrant.*

6.1.2 Σχεδιασμός arrowhead

Με τον ίδιο τρόπο σχεδιάστηκε το unit sell της δομής arrowhead ώστε να δημιουργηθεί το δοκίμιο διαστάσεων 100x100x 70. Στον πίνακα 6.1.2 παρουσιάζονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και στο σχήμα 6.1.2 η απεικόνιση της δομής στο λογισμικό fusion 360.

Παράμετρος	Σύμβολο -Μονάδα	Τιμή
Γωνία κυψέλης	Θ (μοίρες)	30
Μήκος μικρής λοξής πλευράς	L_1 (mm)	8,4
Πάχος τοιχωμάτων	t (mm)	1
Μήκος μεγάλης λοξής πλευράς	L_2 (mm)	13,5
Πάχος εκτός επιπέδου	b (mm)	100

Πίνακας 6.1.2.1 *Διαστάσεις δομής arrowhead.*



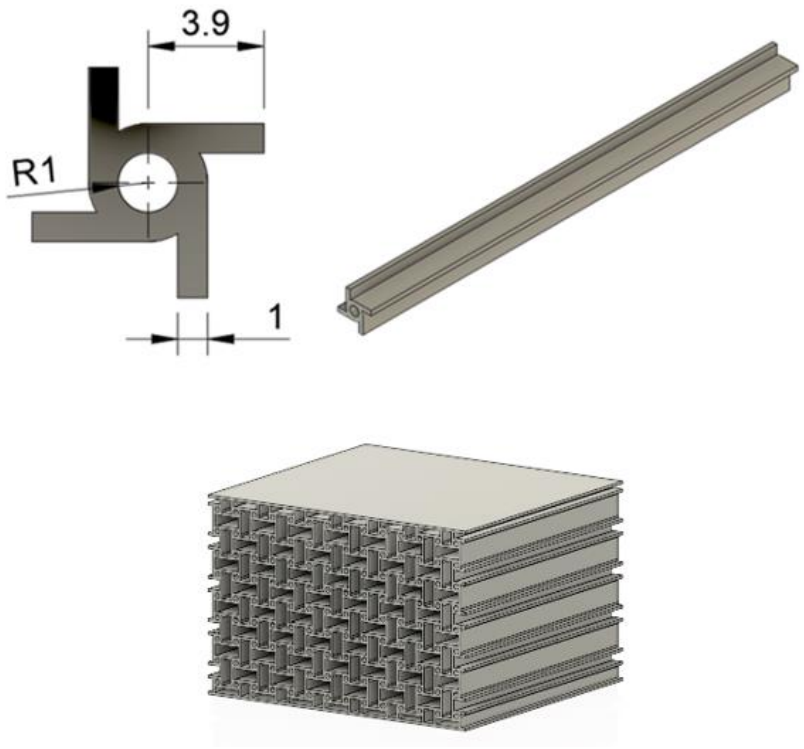
Σχήμα 6.1.2.1 *Unit sell και τελικό δοκίμιο arrowhead.*

6.1.3 Σχεδιασμός anti tetra chiral

Με τον ίδιο τρόπο σχεδιάστηκε το unit sell της δομής anti-tetra chiral ώστε να δημιουργηθεί το δοκίμιο διαστάσεων 100x100x70. Στον πίνακα παρουσιάζονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και στο σχήμα 6.1.3.1.

Παράμετρος	Σύμβολο	Τιμή
Ακτίνα δακτυλίων	r (mm)	1
Μήκος ελάσματος	L (mm)	7,8
Πάχος τοιχωμάτων	t (mm)	1
Πάχος εκτός επιπέδου	b (mm)	100

Πίνακας 6.1.3.1 *Διαστάσεις δομής arrowhead.*

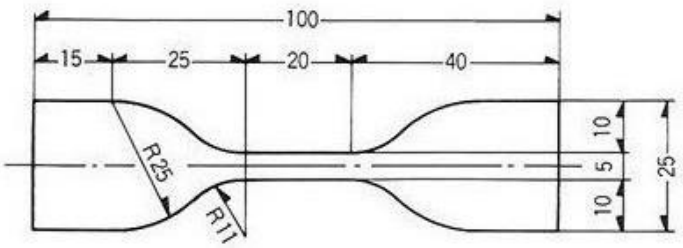


Σχήμα 6.1.3.1 *Unit sell και τελικό δοκίμιο anti-tetra chiral.*

6.2 Ιδιότητες υλικού

Το υλικό που θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα εργασία είναι το θερμοπλαστικό πολυουρεθάνιο (Thermoplastic Polyurethane – TPU) με σκληρότητα Shore 95A το οποίο ανήκει στην κατηγορία των θερμοπλαστικών ελαστομερών (thermoplastic elastomers- TPE). Η συμπεριφορά του TPU υπό δυναμική φόρτιση χαρακτηρίζεται από εκτεταμένη πλαστική παραμόρφωση και μεγάλη επιμήκυνση μέχρι θραύση.

Για τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων του θερμοπλαστικού πολυουρεθάνιου (TPU 95A) χρησιμοποιήθηκαν πειραματικά δεδομένα που προέρχονται από την μελέτη των Haid κ.ά. [83], η οποία εστίασε στον χαρακτηρισμό τεσσάρων εμπορικά διαθέσιμων TPU για χρήση σε προσθετική κατασκευή (Additive Manufacturing). Οι συγγραφείς πραγματοποίησαν εφελκύστηκες και θλιπτικές δοκιμές σύμφωνα με το πρότυπο ISO 37 για θερμοπλαστικά ελαστομερή, χρησιμοποιώντας δοκίμια τύπου (dumb-bell specimens).



Σχήμα 6.2.1 *Δείγματα για τεστ εφελκυσμού θλίψης βάση το πρότυπο ISO-37.*

Η εκτύπωση των δοκιμίων έγινε σε 3D εκτυπωτή Ultimaker S5 με διάμετρο ακροφυσίου 0,4 mm, ύψος στρώσεις 0,12mm, και 100% infill. Όλες οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε μηχανή εφελκυσμού Intron (5 kN) υπό quasi-static ρυθμό παραμόρφωσης 0,006 s^{-1} για τον εφελκυσμό και 0,008 s^{-1} για τη θλίψη.

Η μέτρηση της παραμόρφωσης πραγματοποιήθηκε με ψηφιακή συσχέτιση εικόνας (Digital Image Correlation-DIC), με κάμερα υψηλής ταχύτητας (Phantom Miro R311) και ρυθμό λήψης 24 fps. Από τα αποτελέσματα προέκυψαν οι εξής μέσες τιμές για το TPU 95A:

Ιδιότητα	Τιμή	Μονάδα
Young Modulus (Μέτρο ελαστικότητας)	101,2	Mpa
Poisson ratio (Συντελεστής Poisson)	0,40	
Density (Πυκνότητα)	1220	Kg/m^3
Shear Modulus (Μέτρο διάτμησης)	31,1	Mpa
Yield strength	18	Mpa
Tensile strength	24	Mpa

Πίνακας 6.2.1 *Ιδιότητες υλικού TPU 95A.*

Η τιμή του μέτρου ελαστικότητας που προσδιορίζεται είναι E=101,2 MPa, είναι σημαντικά υψηλότερη από εκείνη που αναφέρεται στα τεχνικά δελτία του υλικού [84] που είναι (περίπου 67 MPa). Η απόκλιση αυτή αποδίδεται στις διαφορετικές συνθήκες εκτύπωσης και δοκιμής που ακολουθήθηκαν στην συγκεκριμένη μελέτη, καθώς τα δοκίμια κατασκευάστηκαν με 100% infill, μικρό ύψος στρώσης (0,12 mm) και χαμηλή ταχύτητα εκτύπωσης (25 mm/s), συνθήκες που οδηγούν σε αυξημένο βαθμό συνοχής μεταξύ στρώσεων και κατά συνέπεια υψηλότερη ακαμψία.

Επιπλέον στα θερμοπλαστικά ελαστομερή όπως το TPU δεν ορίζεται σαφές σημείο διαρροής (Yield strength) του υλικού. Ωστόσο, με βάση την καμπύλη παραμόρφωσης που παρουσιάζεται στην μελέτη [83], η συμβατική αντοχή διαρροής (0,2% offset yield) εκτιμάται περίπου στα 18 MPa, ενώ η αντοχή εφελκυσμού στην θραύση κυμαίνεται γύρω στα 24 MPa. Η διαφορά των δύο τιμών υποδεικνύει τη σταδιακή μετάβαση του υλικού από γραμμική ελαστική σε μη γραμμική συμπεριφορά.

Παρότι το θερμοπλαστικό TPU 95A θεωρείται ισότροπο υλικό σε μακροσκοπική κλίμακα, η διαδικασία προσθετικής κατασκευή με τεχνολογία FDM εισάγει φαινόμενα ανισοτροπίας. Η ανισοτροπία αυτή οφείλεται στον προσανατολισμό των στρώσεων, στο ποσοστό προσκόλλησης μεταξύ τους και στη διεύθυνση φόρτισης σε σχέση με το επίπεδο εκτύπωσης. Ως αποτέλεσμα οι μηχανικές ιδιότητες του εκτυπωμένου TPU διαφέρουν μεταξύ των κατευθύνσεων XY,XZ και Z.

Στην παρούσα μελέτη, δεδομένου ότι το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στην γεωμετρική επίδραση των αυξητικών δομών ως απορροφητές ενέργειας στο σύστημα του προφυλακτήρα σε σύγκριση με τον συμβατικό απορροφητή (EPP), το υλικό θεωρήθηκε ισότροπο γραμμικό με ιδιότητες που αντιστοιχούν στο συμπαγές TPU 95A, όπως αυτές προκύπτουν από το συγκεκριμένο άρθρο. Συνεπώς, τα πειραματικά δεδομένα που παρουσιάστηκαν σε σχετική βιβλιογραφία επιβεβαιώνουν ότι οι μηχανικές ιδιότητες των εκτυπωμένων TPU μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως αξιόπιστη βάση για προσομοιώσεις, εφόσον τηρούνται αντίστοιχες ρυθμίσεις εκτύπωσης.

6.3 Ομογενοποίηση (homogenization)

Λόγω της πολύπλοκης γεωμετρίας και του υψηλού υπολογιστικού κόστους που απαιτείται για την προσομοίωση των τριών αυξητικών δομών μέσω πεπερασμένων στοιχείων εξετάζεται η εφαρμογή της μεθόδου της ομογενοποίησης. Η τεχνική αυτή επιτρέπει την αντικατάσταση της πολύπλοκης μικροδομής με ένα ισοδύναμο συνεχές υλικό, του οποίου οι μηχανικές ιδιότητες προκύπτουν από την ανάλυση ενός αντιπροσωπευτικού όγκου (Representative Volume Element – RVE). Με τον τρόπο αυτό η συνολική απόκριση της δομής μπορεί να προβλεφθεί με υψηλή ακρίβεια, ενώ παράλληλα μειώνεται δραστικά το υπολογιστικό κόστος.[85]

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας η ομογενοποίηση υλοποιείται μέσω του λογισμικού nTopology που καθιστά δυνατή την ακριβή εκτίμηση των ισοδύναμων μηχανικών ιδιοτήτων. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται το block (homogenized unit cell), το οποίο εφαρμόζει έξι ανεξάρτητες παραμορφώσεις- τρεις αξονικές (x, y, z) και τρείς διατμιτικές (xy, xz, yz) - υπό περιοδικές οριακές συνθήκες με στόχο των ισοδύναμων μηχανικών ιδιοτήτων της κυψέλης. Από την ανάλυση προκύπτει ο πλήρης πίνακας δυσκαμψίας (Cij) καθώς και η ισοδύναμη πυκνότητα της δομής, στοιχεία που επιτρέπουν την ακριβή αναπαράσταση της δομής.

$$\begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{14} & C_{24} & C_{34} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{15} & C_{25} & C_{35} & C_{45} & C_{55} & C_{56} \\ C_{16} & C_{26} & C_{36} & C_{46} & C_{56} & C_{66} \end{bmatrix}$$

Σχήμα 6.3.1 *Πίνακας δυσκαμψίας 6x6*

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι οι υπολογιστικές ιδιότητες μπορούν να εξαχθούν μέσω του block export material και να χρησιμοποιηθούν απευθείας σε λογισμικά πεπερασμένων στοιχείων, όπως το Abaqus ή το LS-DYNA. Έτσι, οι περίπλοκες αυξητικές δομές αντικαθίστανται από συμπαγή μοντέλα με ανισοτροπικές ιδιότητες, μειώνοντας δραστικά τον υπολογιστικό φόρτο, χωρίς σημαντική απώλεια ακρίβειας.

Επίσης, σημαντικά πλεονεκτήματα της ομογενοποίησης είναι:

- **Μείωση υπολογιστικού κόστους:** Η αντικατάσταση της πολύπλοκης δομής με ισοδύναμο συνεχές υλικό μειώνει δραστικά το αριθμό βαθμών ελευθερίας στο μοντέλο, καθιστώντας εφικτές προσομοιώσεις που διαφορετικά θα ήταν αδύνατες λόγω μεγάλου mesh ή χρόνου επίλυσης.[85]
- **Διατήρηση ακρίβειας:** Η μέθοδος μπορεί να αναπαράγει με υψηλή ακρίβεια τις ισοδύναμες μηχανικές ιδιότητες της δομής (E,G,v,Cij), με αποκλίσεις από τα πλήρη μοντέλα που παραμένουν σε χαμηλά ποσοστά (<15%). [86]
- **Εφαρμογή σε πολύπλοκες γεωμετρίες:** Δίνει την δυνατότητα μελέτης αυξητικών δομών ή άλλων αρχιτεκτονικών υλικών, των οποίων η προσομοίωση σε πραγματική γεωμετρία θα ήταν ανέφικτη.
- **Εξοικονόμηση χρόνου στη σχεδίαση:** Η δυνατότητα ταχείας εκτίμησης ισοδύναμων ιδιοτήτων επιτρέπει πιο αποδοτικό κύκλο σχεδίασης, χωρίς την ανάγκη επίλυσης πλήρων και πολύπλοκων μοντέλων σε κάθε παραλλαγή.

Ωστόσο, η μέθοδος συνοδεύεται και από ορισμένους περιορισμούς:

- Απαιτείται η κυψέλη να είναι πλήρως περιοδική και με ομοιόμορφο πάχος τοιχωμάτων
- Δεν λαμβάνονται υπόψη τοπικά φαινόμενα όπως συγκεντρώσεις τάσεων ή ακτίνες καμπυλότητας στις συνδέσεις

6.3.2 Θεωρητικό υπόβαθρο και βασικές σχέσεις

Η μέθοδος της ομογενοποίησης έχει ως βασικό στόχο την περιγραφή της συμπεριφοράς μιας πολύπλοκης μικροδομής μέσω ισοδύναμων μακροσκοπικών ιδιοτήτων. Για τον σκοπό αυτό, απαιτείται η μαθηματική διατύπωση της σχέσης μεταξύ τοπικών τάσεων και παραμορφώσεων στο αντιπροσωπευτικό στοιχείο όγκου (Representative Volume Element-RVE) και των αντίστοιχων μακροσκοπικών μεγεθών.

Στο πλαίσιο της ομογενοποίησης, η συμπεριφορά της μικροδομής εκφράζεται μέσω όγκου-μέσων μεγεθών που ορίζονται στο (RVE). Οι μακροσκοπικές τάσεις και παραμορφώσεις ορίζονται ως:

$$\bar{\sigma}_{ij} = \frac{1}{V_{RVE}} \int_{V_{RVE}}^{1} \sigma_{ij} \, \mathrm{d}V \tag{6.3.2.1}$$

Και

$$\bar{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{V_{RVE}} \int_{V_{RVE}}^{1} \varepsilon_{ij} \, \mathrm{d}V$$

(6.3.2.2)

Το V_{RVE} είναι ο όγκος, το σ_{ij} οι τοπικές τάσεις και ε_{ij} οι τοπικές παραμορφώσεις. Με αυτόν τον τρόπο, η πολύπλοκη τοπική συμπεριφορά αναπαρίσταται με μακροσκοπικές ποσότητες που περιγράφουν την ισοδύναμη απόκριση της δομής.

Από την αρχή ισότητας ενέργειας (Hill-Mandel), ισχύει η σχέση :

$$\bar{\sigma}_{ij}\bar{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{V_{RVE}} \int_{V_{RVE}}^{1} v_{ij}\bar{\varepsilon}_{ij} \, \mathrm{d}V$$

(6.3.2.3)

Αυτό διασφαλίζει ότι η ενέργεια που αποθηκεύει το ισοδύναμο υλικό σε μακροσκοπική κλίμακα είναι ίδια με την ενέργεια που αποθηκεύει η πραγματική μικροδομή σε μικρό-κλίμακα.

Η θεμελιώδης σχέση τάσεων – παραμορφώσεων που διέπει την ελαστική συμπεριφορά είναι:

$$\sigma_{ij} = C_{\mathrm{i}j}^{eff} \varepsilon_{ij}$$

(6.3.2.4)

Όπου C_{ij}^{eff} είναι ο ισοδύναμος τανυστής δυσκαμψίας τέταρτης τάξης. Ο τανυστής συνδέει τις μέσες τάσεις με τις μέσες παραμορφώσεις και εκφράζει τις μηχανικές ιδιότητες του ισοδύναμου υλικού που αντιπροσωπεύει το RVE. Η πρακτική διαδικασία βασίζεται στην επιβολή έξι ανεξάρτητων μονάδων παραμόρφωσης τρείς μονοαξονικές (ε_{11},ε_{22},ε_{33}) και τρείς διατμιτικές (G_{12},G_{22},G_{33}). Για κάθε φόρτιση υπολογίζεται η κατανομή των τάσεων και στη συνέχεια η μέση τιμή τους. Με τον τρόπο αυτό συμπληρώνονται οι αντίστοιχες στήλες του πίνακα δυσκαμψίας.

Στην πράξη, ο τανυστής δυσκαμψίας C_{ij}^{eff} μεταφέρεται σε μορφή Voigt, δηλαδή ως πίνακας 6x6 και από εκεί προκύπτουν οι ισοδύναμες ιδιότητες, όπως μέτρα ελαστικότητας (E_X, E_y, E_Z), οι λόγοι Poisson (v_{xy}, v_{yz}, v_{xz}) και οι διατμητική συντελεστές (G_{xy}, G_{yz}, G_{xz}). Ανάλογα με τη συμμετρία της μικροδομής, το ισοδύναμο υλικό μπορεί να θεωρηθεί ισότροπο (2 ανεξάρτητες σταθερές), ορθότροπο (9 ανεξάρτητες σταθερές) ή γενικότερα ανισότροπο (21 ανεξάρτητες σταθερές).

6.3.3 Βήματα ομογενοποίησης στο n-topology

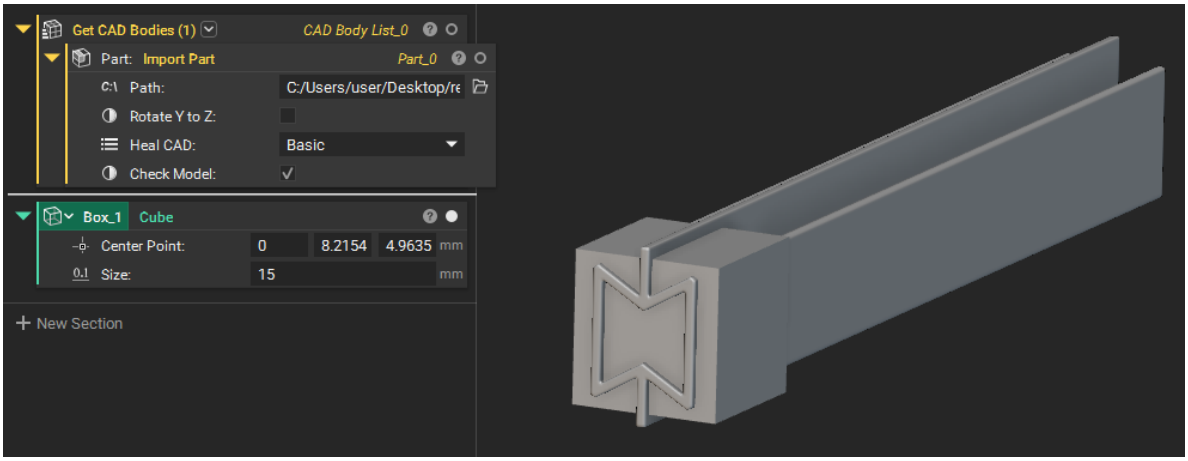
Η διαδικασία ομογενοποίησης είναι σχεδόν ίδια για κάθε κυψέλη (unit cell) που εξετάστηκε. Παρόλο που χρησιμοποιήθηκαν τρεις αυξητικές δομές εφαρμόστηκε η ίδια μεθοδολογία στο λογισμικό nTopology. Συνεπώς στις ενότητες που ακολουθούν παρουσιάζονται τα βήματα για την ομογενοποίηση, τα οποία είναι κοινά και για τις τρείς περιπτώσεις.

1. **Εισαγωγή κυψέλης (unit cell)**

Αρχικά πραγματοποιήθηκε η εισαγωγή του μοντέλου της κυψέλης σε μορφή step αρχείου (.stp) από το λογισμικό σχεδίασης Futon 360 στο nTopology. Η εισαγωγή έγινε μέσω της επιλογής import CAD file, ώστε το γεωμετρικό μοντέλο της αυξητικής δομής να φορτωθεί στο περιβάλλον του προγράμματος και να αποτελέσει τη βάση για την διαδικασία ομογενοποίησης.

Το import part εισάχθηκε στο Get CAD bodies, ώστε να αναγνωριστεί ως σώμα (body) πάνω στο οποίο μπορούν να γίνουν παραμετρικές λειτουργίες. Με αυτό τον τρόπο, το μοντέλο μετατρέπεται σε στοιχείο που μπορεί να συνδυαστεί με άλλα γεωμετρικά primitives (cube, sphere κλπ.) ή να υποστεί περαιτέρω επεξεργασία όπως κοπή.

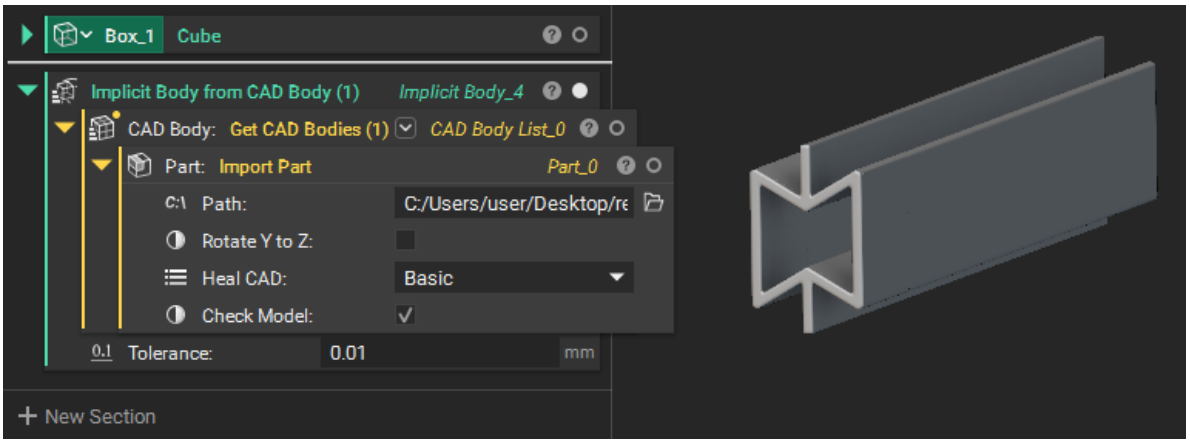
Στη συνέχεια δημιουργήθηκε ένας κύβος (cube) ο οποίος περιλαμβάνει ένα τμήμα της κυψέλης. Με τον τρόπο αυτό επιλέχθηκε και απομονώθηκε το αντιπροσωπευτικό κομμάτι της γεωμετρίας που θα χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 6.3.3.1.



Σχήμα 6.3.3.1 *Στο αριστερό τμήμα εμφανίζεται το tree των ενεργειών και η απεικόνιση της κυψέλης και του κύβου για το αντιπροσωπευτικό στοιχείο της ομογενοποίησης.*

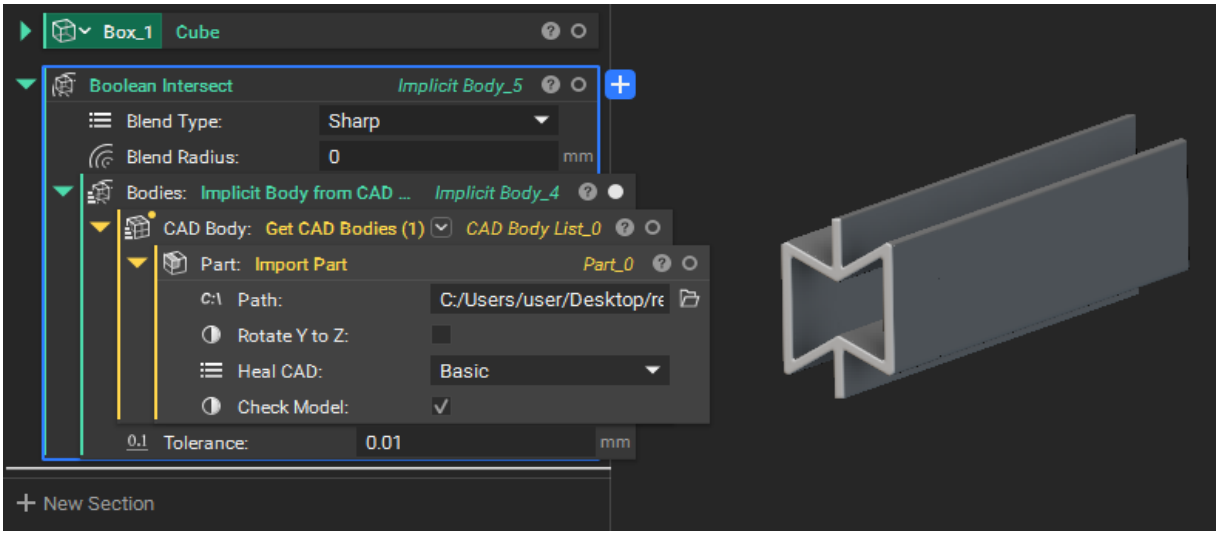
2. Διαδικασία προ επεξεργασίας και απομόνωσης τμήματος της κυψέλης

Αρχικά γίνεται μετατροπή του μοντέλου CAD σε implicit body, καθώς είναι απαραίτητο για να εξασφαλιστεί ότι το μοντέλο της κυψέλης, μπορεί να συνδυαστεί με άλλα γεωμετρικά στοιχεία όπως ο κύβος αποκοπής.



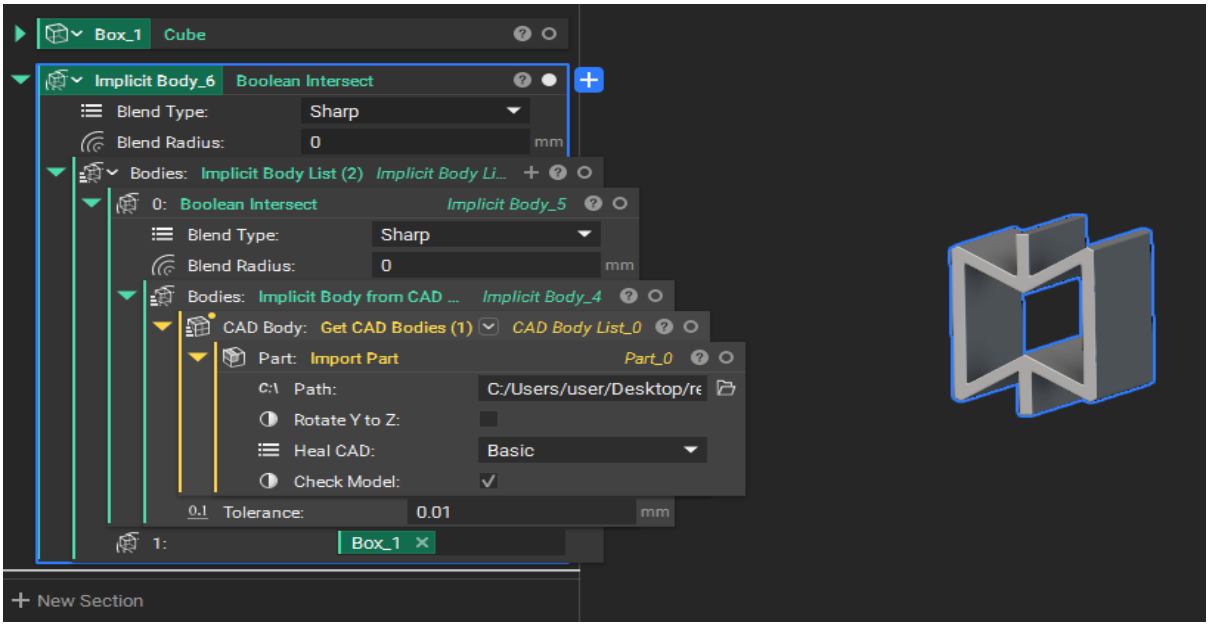
Σχήμα 6.3.3.2 *Μετατροπή της γεωμετρίας CAD σε implicit Body με tolerance 0.01 mm, ώστε να είναι δυνατή η εφαρμογή Boolean πράξεων και περαιτέρω επεξεργασία.*

Στη συνέχεια το μοντέλο της κυψέλης που έχει μετατραπεί σε implicit body εισάγεται στον κόμβο Boolean intersect. Η διαδικασία αυτή είναι απαραίτητη, καθώς το nTopology εκτελεί Boolean πράξεις μεταξύ implicit bodies. Επομένως χωρίς αυτή την μετατροπή και την εισαγωγή στο Boolean note, δεν θα ήταν δυνατή η πραγματοποίηση της τομής με τον κύβο αποκοπής.



Σχήμα 6.3.3.3 *Εισαγωγή του implicit body της κυψέλης στον κόμβο Boolean intersect, ώστε να καταστεί δυνατή η εκτέλεση πράξεων τομής.*

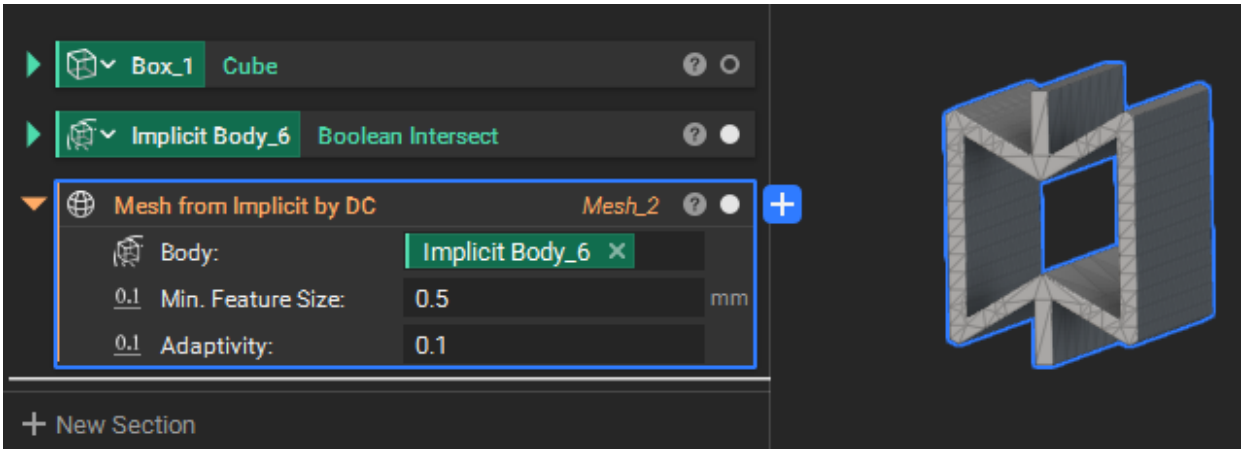
Έπειτα , το implicit body εισάγεται σε ένα νέο Boolean intersect, στο οποίο προστίθεται και ο κύβος (box1). Η πράξη τομής (intersect) διατηρεί αποκλειστικά το κοινό τμήμα των δύο σωμάτων με αποτέλεσμα την απομόνωση του τμήματος της κυψέλης που βρίσκεται εντός του κύβου.



Σχήμα 6.3.3.4 *Εφαρμογή Boolean intersect μεταξύ του implicit body της κυψέλης και του κύβου (box1), με αποτέλεσμα την απομόνωση του τμήματος της γεωμετρίας που βρίσκεται εντός του κύβου.*

3. Δημιουργία πλέγματος Mesh

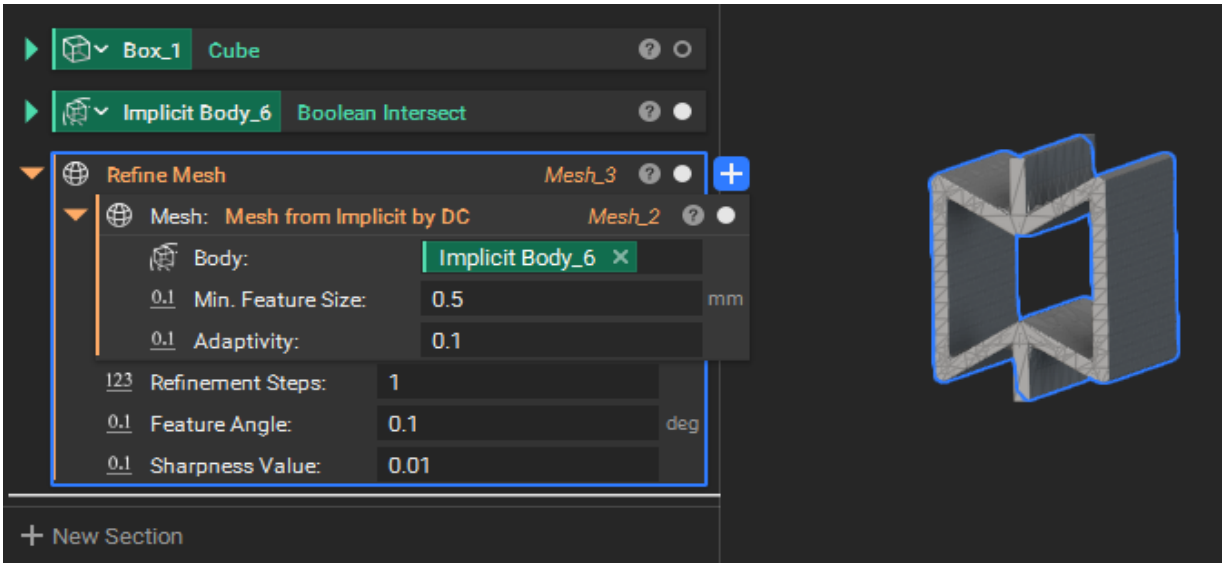
Μετά την απομόνωση του τμήματος της κυψέλης μέσω Boolean intersect, δημιουργήθηκε επιφανειακό πλέγμα με τον κόμβο Mesh from implicit by DC, χρησιμοποιώντας ως σώμα εισόδου το αποτέλεσμα της τομής. Η μέθοδος (dual counting) παράγει τρίγωνο πλέγμα κατάλληλο για προ επεξεργασία για χρήση ως βάση στο επόμενο στάδιο δηλαδή πριν από την δημιουργία του Volume Mesh.



Σχήμα 6.3.3.5 *Δημιουργία επιφανειακού πλέγματος του απομονωμένου σώματος με Mesh from implicit by DC (Feature Size =0.5, Adaptivity=0,1)*

Μετά την δημιουργία του αρχικού επιφανειακού πλέγματος, εφαρμόζεται Refine Mesh για την βελτίωση της ποιότητας του Mesh. Χρησιμοποιείται για να αποδώσει με μεγαλύτερη ακρίβεια τις λεπτομέρειες της γεωμετρίας, μειώνοντας τα μεγάλα τρίγωνα και αυξάνοντας την ομοιομορφία του πλέγματος. Οι παράμετροι που φαίνονται στο σχήμα είναι:

- Refinement Steps = 1: Πόσες φορές θα εφαρμοστεί η διαδικασία (λεπτομέρεια).
- Feature Angle = 0.1: Ελάχιστη γωνία που αναγνωρίζεται ως χαρακτηριστικό για να κρατηθεί.
- Sharpness Value = 0.01: Πόσο αιχμηρές λεπτομέρειες θα διατηρηθούν.



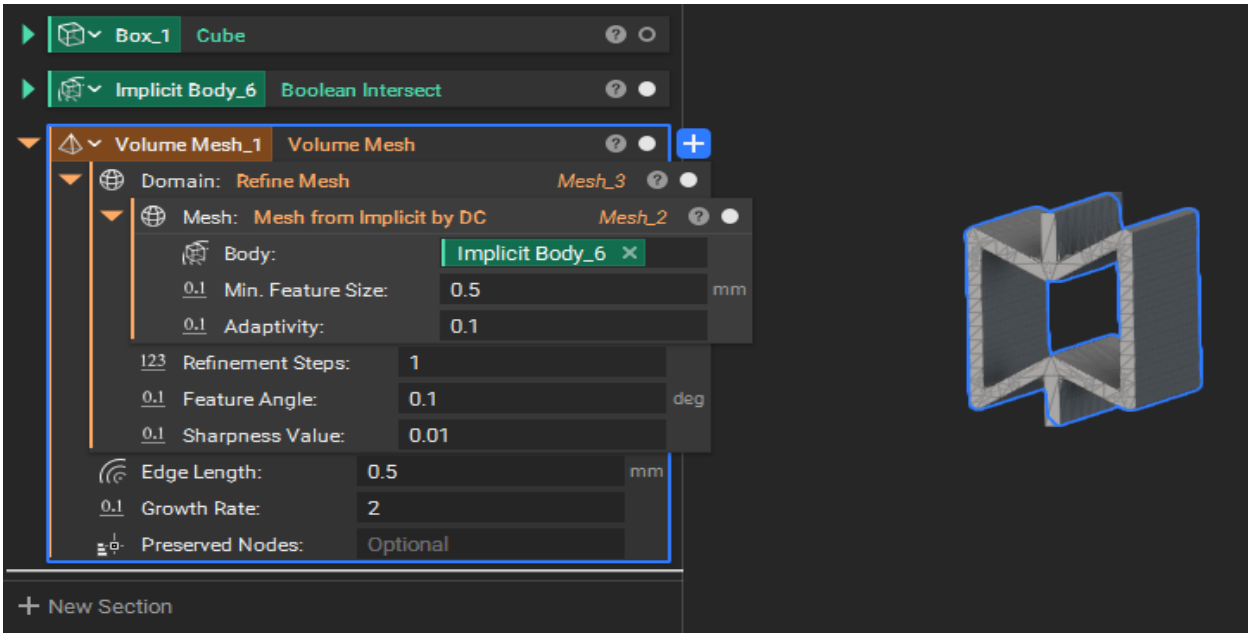
Σχήμα 6.3.3.6 *Βελτίωση του επιφανειακού πλέγματος με το Refine Mesh για την ακριβέστερη απόδοση των χαρακτηριστικών της γεωμετρίας.*

Το τελικό στάδιο της διαδικασίας αποτελεί η δημιουργία ογκοπλέγματος μέσω Volume Mesh. Με το βήμα αυτό, το επιφανειακό πλέγμα μετατρέπεται σε τρισδιάστατο ογκοπλέγμα τετραεδρικών στοιχείων, το οποίο είναι απαραίτητο για ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων και ομογενοποίησης. Ουσιαστικά το σώμα γεμίζει με στοιχεία (τετράεδρα), ώστε να μπορεί να δεχτεί φορτία, οριακές συνθήκες και να υπολογιστούν οι μηχανικές του ιδιότητες.

Οι ρυθμίσεις που φαίνονται στο σχήμα είναι:

- Edge Length = 0.5 mm: Βασικό μέγεθος στοιχείων (όσο πιο μικρό τόσο πιο λεπτομερές).
- Growth Rate = 2: Πόσο γρήγορα μεγαλώνει το μέγεθος των στοιχείων καθώς απομακρύνονται από λεπτομέρειες

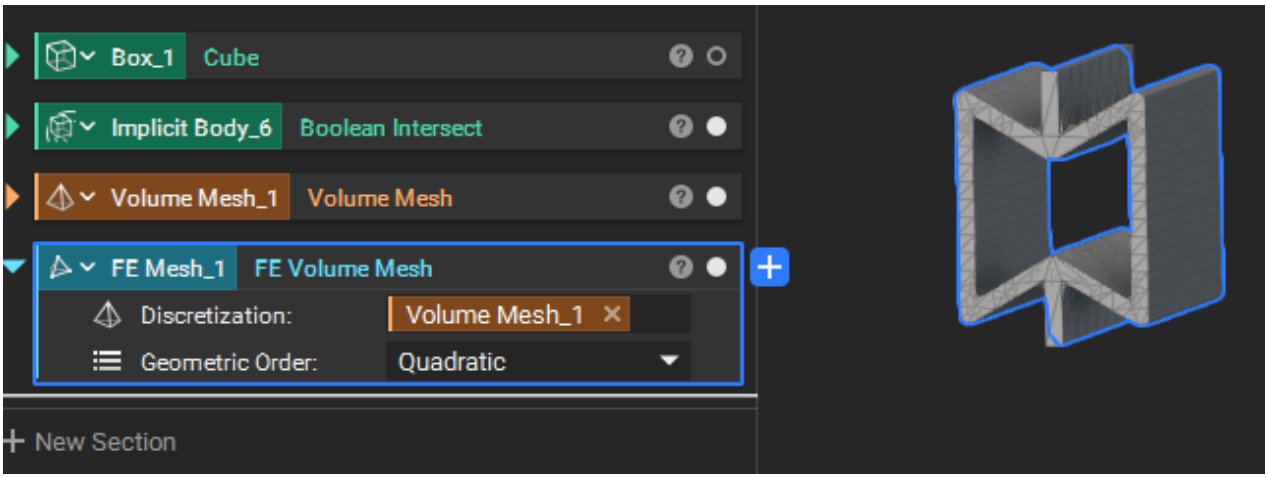
- Preserved Notes (optional): Δυνατότητα να διατηρηθούν συγκεκριμένη κόμβοι αν χρειάζεται για boundary conditions.



Σχήμα 6.3.3.7 *Δημιουργία ογκοπλέγματος του απομονωμένου τμήματος της κυψέλης μέσω Volume Mesh.*

4. Δημιουργία FE Volume Mesh για ομογενοποίηση

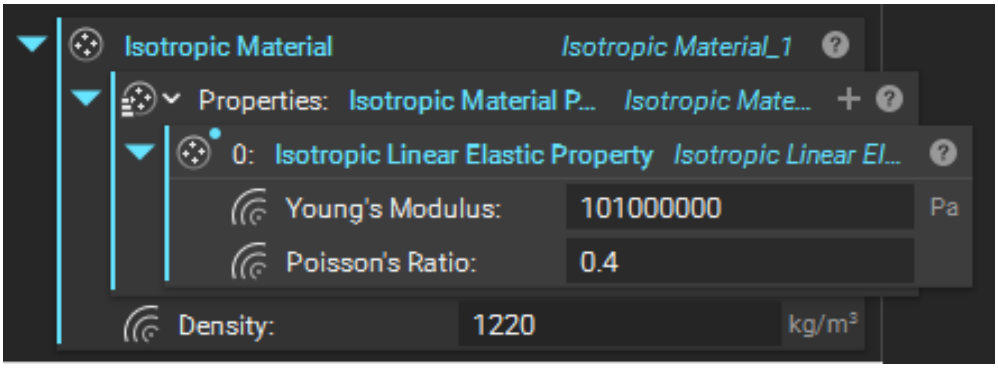
Μετά την δημιουργία του ογκοπλέγματος (Volume Mesh), πραγματοποιείται η μετατροπή του σε FE Volume Mesh. Το στάδιο αυτό είναι απαραίτητο, καθώς η διαδικασία ομογενοποίησης απαιτεί τη διακριτοποίηση του μοντέλου σε πεπερασμένα στοιχεία, ώστε να καταστεί δυνατή η αριθμητική επίλυση.



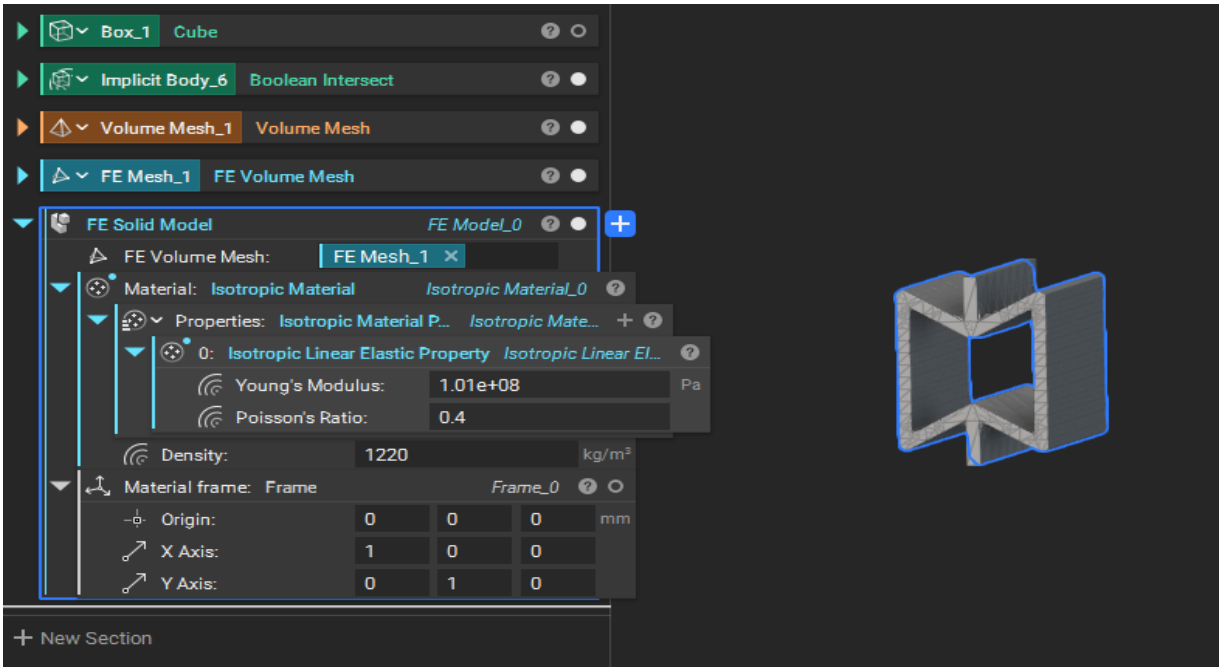
Σχήμα 6.3.3.8 *Δημιουργία FE Volume Mesh από το ογκοπλέγμα της κυψέλης*

5. Δημιουργία FE Solid Model και ορισμός υλικού

Στην συνέχεια, το FE Volume Mesh μετατρέπεται σε FE Solid Model. Το στάδιο αυτό είναι απαραίτητο προκειμένου το πλέγμα να συνδεθεί με το σύστημα αναφοράς και τις ιδιότητες του υλικού, ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην αριθμητική ανάλυση.



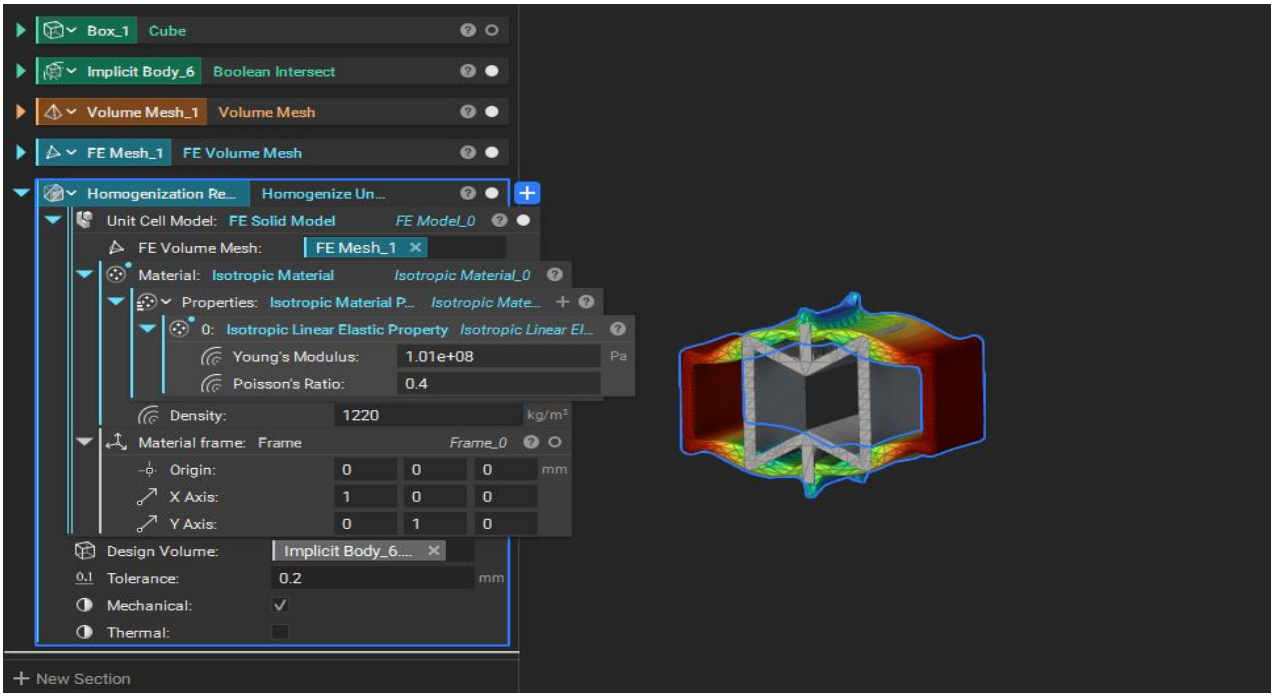
Σχήμα 6.3.3.9 Ιδιότητες υλικού



Σχήμα 6.3.3.10 *Δημιουργία FE Solid Mesh από το FE Volume Mesh με τον ορισμό του συστήματος αναφοράς και την αντιστοίχιση ιδιοτήτων υλικού.*

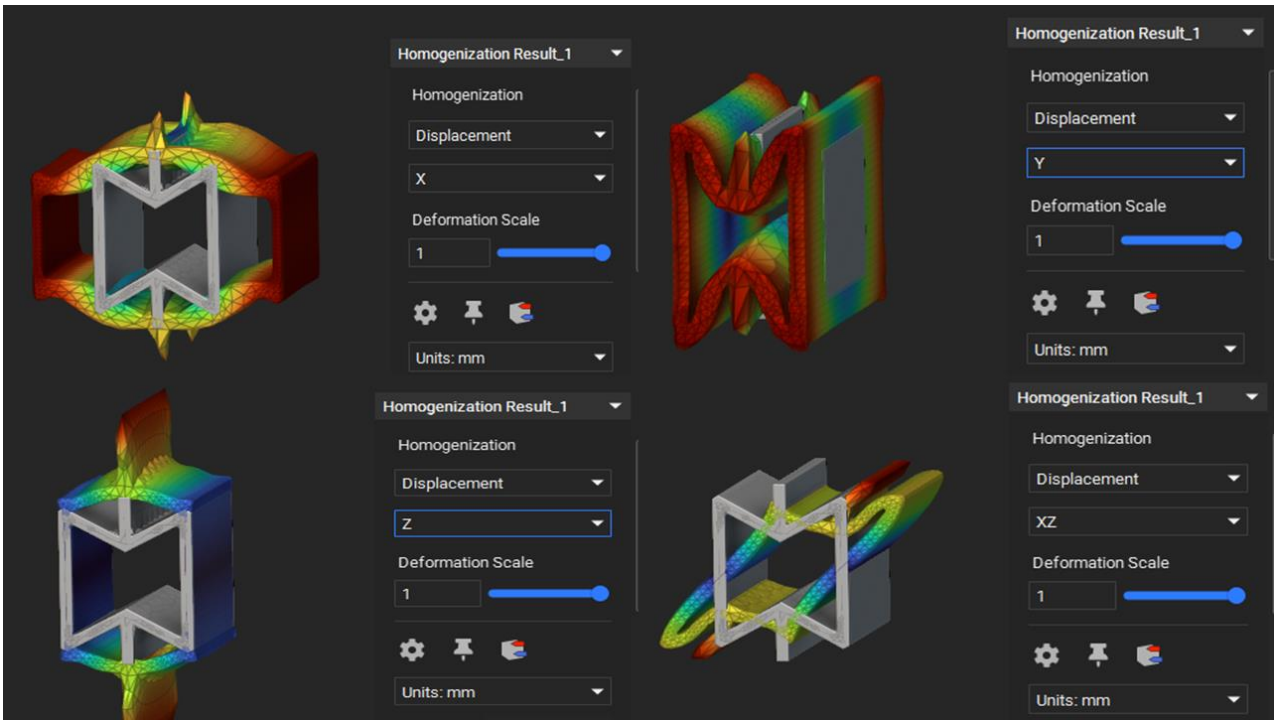
6. Ομογενοποίηση (Homogenization)

Μετά τη δημιουργία το FE Solid model, πραγματοποιείται η ομογενοποίηση με την επιλογή του κόμβου Homogenize Unit Cell, όπου υποβάλει περιοδικές οριακές συνθήκες (PBCs) στο αντιπροσωπευτικό στοιχείο (unit cell) και υπολογίζει ισοδύναμες (effective) ιδιότητες. Στο unit cell model επιλέγεται το FE Solid Model του απομονωμένου τμήματος και Design Volume ορίζεται το ίδιο box που χρησιμοποιήθηκε στην αποκοπή της κυψέλης.

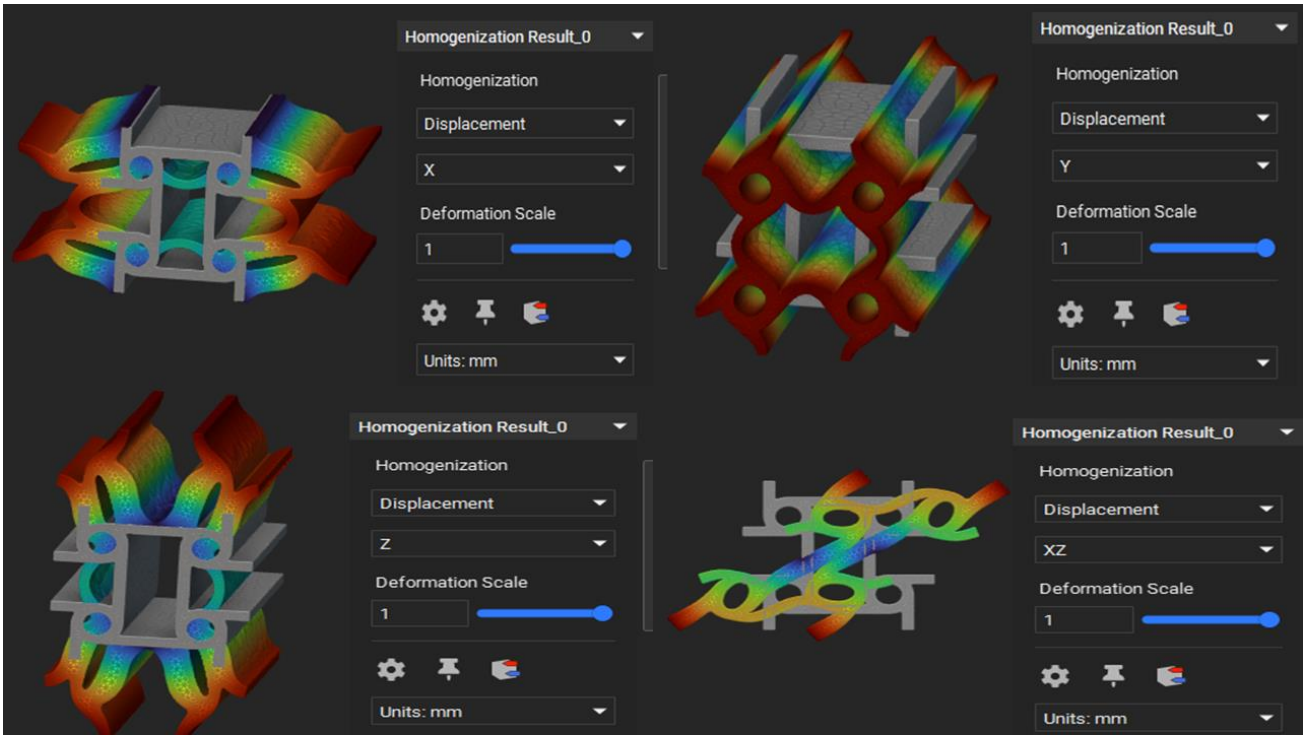


Σχήμα 6.3.3.11 *Ρύθμιση του κόμβου Homogenize Unit Cell*

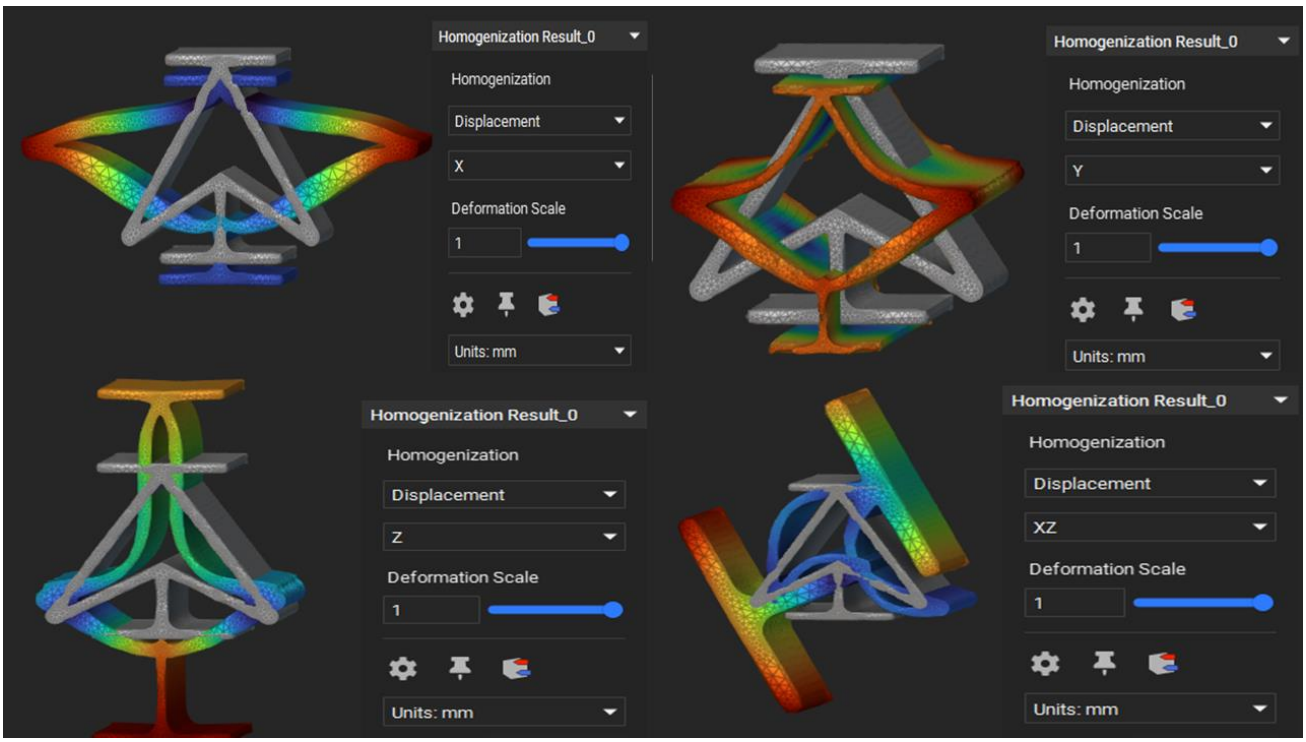
6.2.4 Οπτικά αποτελέσματα δομών



Σχήμα 6.2.4.1 *Οπτικοποίηση των πεδίων μετατοπίσεων από την ομογενοποίηση της μονάδας κυψέλης re-entrant στους άξονες X,Y,Z,XZ.*



Σχήμα 6.2.4.2 *Οπτικοποίηση των πεδίων μετατοπίσεων από την ομογενοποίηση της μονάδας κυψέλης anti-tetra chiral στους άξονες X,Y,Z,XZ.*



Σχήμα 6.2.4.3 *Οπτικοποίηση των πεδίων μετατοπίσεων από την ομογενοποίηση της μονάδας κυψέλης Arrowhead στους άξονες X,Y,Z,XZ.*

6.4 Αποτελέσματα ομογενοποιημένου υλικού

Μετά την ολοκλήρωση της ομογενοποίησης, το πεδίο των αποτελεσμάτων (Homogenization Result) μετατρέπεται σε υλικό και εξάγεται, ώστε να χρησιμοποιηθεί σε επόμενες αναλύσεις. Η διαδικασία

περιλαμβάνει τρία στάδια, όπως ορισμός ιδιοτήτων βάσης, μετατροπή του αποτελέσματος σε υλικό και τελική εξαγωγή του αρχείου.

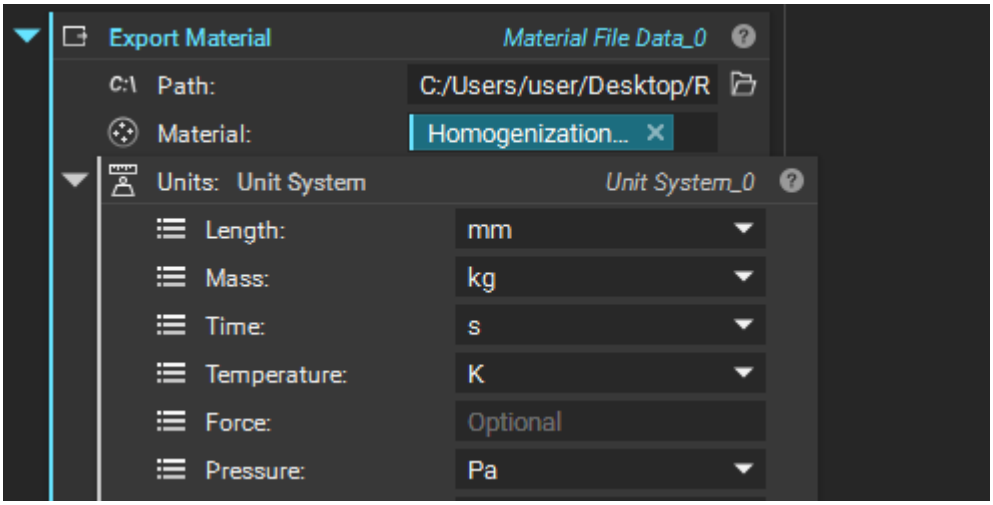
Ο ορισμός ιδιοτήτων βάσης πριν την ομογενοποίηση φαίνεται στο βήμα 5 (σχήμα 6.9), με γραμμικές ελαστικές ιδιότητες:

- Young's Modulus: 1,01 x 10^8 Pa
- Poisson Ratio: 0,4
- Density: 1220 kg/m^3

Οι τιμές αυτές χρησιμοποιούνται ως υλικό αναφοράς (TPU 95 A) στο μοντέλο και εξασφαλίζουν ότι το σύστημα μονάδων παραμένει συνεπές σε όλη την ροή (Pa-mm-kg). Στην συνέχεια, επιλέγεται μέσα από το Homogenize unit cell η επιλογή material, ώστε να παραχθεί υλικό με τις ισοδύναμες effective ιδιότητες της μονάδας κυψέλης. Ανάλογα με την συμμετρία της δομής, το υλικό μπορεί να είναι ισότροπο, ορθότροπο ή γενικά ανισότροπο.

Για την εξαγωγή του υλικού χρησιμοποιήθηκε ο κόμβος Export Material όπως φαίνεται στο (σχήμα 6.4.1), όπου:

- Material: Ορίστηκε το υλικό που προέκυψε από την ομογενοποίηση.
- Path: Καθορίστηκε ο φάκελος στον τοπικό δίσκο.
- Units: Επιβεβαιώθηκε το Unit System (συνεπές με Pa-mm-kg) πριν την εξαγωγή.

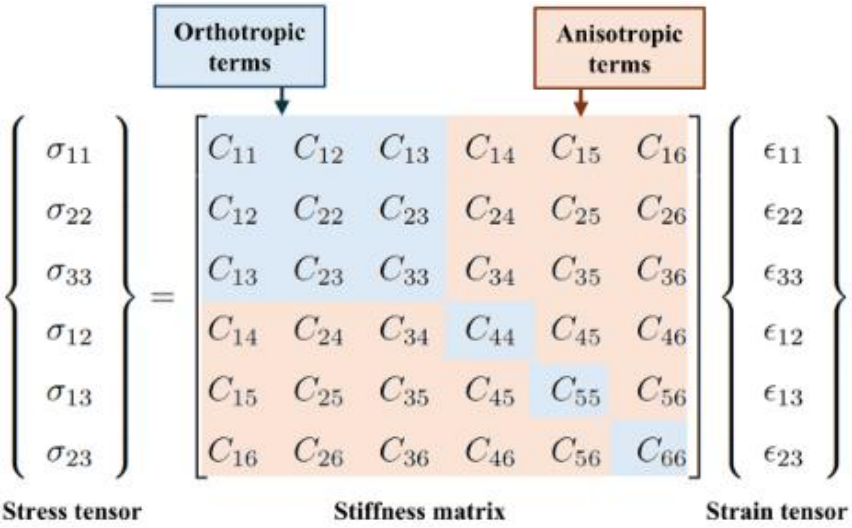


Σχήμα 6.4.1 *Εξαγωγή του υλικού που προέκυψε από την ομογενοποίηση μέσω του κόμβου Export Material, με ορισμό Material το αποτέλεσμα της ομογενοποίησης και το κατάλληλο Unit System.*

Τα αποτελέσματα της ομογενοποίησης εξάγονται για κάθε δομή ξεχωριστά ως πίνακας ακαμψίας 6x6 σε μορφή CSV (Voigt notation: xx,yy,zz,yz,xz,xy) όπως φαίνεται στο σχήμα 6.3.2. Ο πίνακας C είναι συμμετρικός και δίνεται σε μονάδες Pa. Οι εκτός διαγώνιού όροι εκφράζουν συζεύξεις μεταξύ κατευθύνσεων, ενώ τα στοιχεία των γραμμών/στηλών 4 έως 6 αντιστοιχούν σε διατμιτικές ακαμψίες.

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
R1	9206160	2006230	-4407800	101,217	-1081,89	-675,02
R2	2006230	32354900	-156387	862,699	2879,61	5079,82
R3	-4407800	-156387	4305030	177,988	563,836	978,501
R4	101,217	862,699	177,988	5377090	176,31	-13,4529
R5	-1081,89	2879,61	563,836	176,31	2467320	-393,631
R6	-675,02	5079,82	978,501	-13,4529	-393,631	272047

Σχήμα 6.4.2 *Εξαγόμενος πίνακας ακαμψίας C (6x6) από την ομογενοποίηση στο nTopology, σε Voigt μορφή και μονάδες Pa της δομής re-entrant*



Σχήμα 6.4.3 *Μορφή του πίνακα δυσκαμψίας [C] στην γενική ανισοτροπική περίπτωση. Οι μπλε όροι αντιστοιχούν στην ορθότροπη συμμετρία, ενώ οι πορτοκαλί εισάγουν πλήρη ανισοτροπία.*

Για την ανάλυση των μηχανικών ιδιοτήτων, αναπτύχθηκε ειδικό υπολογιστικό εργαλείο στο περιβάλλον Microsoft Excel. Το εργαλείο αυτό επιτρέπει την άμεση μετατροπή των αποτελεσμάτων της ομογενοποίησης (σε μορφή πίνακα δυσκαμψίας C) σε φυσικές μηχανικές ιδιότητες του υλικού, όπως τα μετρά ελαστικότητας, οι λόγοι Poisson και τα μέτρα διάτμησης.

Η ανάπτυξη βασίστηκε στη θεωρεία γραμμικής ελαστικότητας. Ο αρχικός πίνακας C προέρχεται από τη διαδικασία ομογενοποίησης αντιπροσωπευτικού στοιχείου όγκου (RVE) και περιγράφει τη σχέση μεταξύ τάσεων και παραμορφώσεων του υλικού σε μακροκλίμακα.

Η συμπεριφορά ενός ανισότροπου γραμμικά ελαστικού υλικού περιγράφεται από τον νόμο του Hooke σε μητρωική μορφή:

$$\{\sigma\} = [c]\{\varepsilon\} \tag{6.4.1}$$

Όπου $\{\sigma\}$ είναι διάνυσμα τάσεων και $\{\varepsilon\}$ το διάνυσμα παραμορφώσεων σε μορφή Voigt. Η μήτρα [C] είναι η μήτρα δυσκαμψίας του υλικού και έχει διαστάσεις 6 X 6. Η αντίστροφη της μήτρας ορίζει τη μήτρα συμμόρφωσης:

$$[s] = [c]^{-1} \tag{6.4.2}$$

Από τα στοιχεία της μήτρας συμμόρφωσης [s] υπολογίζονται οι μηχανικές ιδιότητες κατά τις κύριες διευθύνσεις του υλικού, σύμφωνα με τις σχέσεις:

$$E_i = \frac{1}{S_{ii}}, v_{i_j} = -\frac{s_{ij}}{S_{ii}}, G_{i_j} = \frac{1}{S_{kk}} \tag{6.4.3}$$

Οπού το E_i είναι το μέτρο ελαστικότητας στη διεύθυνση i, v_{ij} ο λόγος Poisson μεταξύ των διευθύνσεων i και j και G_{ij} το μέτρο διάτμησης. Οι σχέσεις προκύπτουν από την αναλυτική μορφή της εξίσωσης (6.4.3) και είναι θεμελιώδεις στην ανάλυση ορθότροπων και ανισότροπων υλικών.[87]

Η συμμετρική μορφή των πινάκων [C] και [S] εξασφαλίζει την ενεργειακή ισοδυναμία και την αμοιβαιότητα των λόγων Poisson, δηλαδή:

$$\frac{v_{ij}}{E_i} = \frac{v_{ji}}{E_j} \tag{6.4.4}$$

Παρότι το υλικό είναι ανισότροπο, συχνά απαιτείται να χρησιμοποιηθεί ένα ισότροπο ισοδύναμο μοντέλο για την εισαγωγή σε εμπορικό λογισμικό FEM. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται οι μέσοι όροι Voigt-Reuss-Hill, οι οποίοι προσδιορίζουν το άνω και κάτω όριο δυσκαμψίας, καθώς και την μέση ισοτροπική εκτίμηση του υλικού.

Μέσος Voigt- Άνω όριο (ομοιόμορφή παραμόρφωση)

$$k_v = \frac{c_{11} + c_{22} + c_{33} + 2(c_{12} + c_{13} + c_{14})}{9} \tag{6.4.5}$$

$$G_v = \frac{C_{11} + C_{22} + C_{33} - C_{12} - C_{13} - C_{23} + 3 \cdot (C_{44} + C_{55} + C_{66})}{15} \tag{6.4.6}$$

Η προσέγγιση αυτή προτάθηκε από τον Voigt (1889) και βασίζεται στην παραδοχή ότι όλα τα σημεία του υλικού υφίστανται την ίδια παραμόρφωση.[88]

Μέσος Reuss- Κάτω όριο (ομοιόμορφη τάση):

$$k_R = \frac{1}{s_{11} + s_{22} + s_{33} + 2(s_{12} + s_{13} + s_{23})} \tag{6.4.7}$$

$$G_R = \frac{15}{4(s_{11} + s_{22} + s_{33} - s_{12} - s_{13} - s_{23}) + 3(s_{44} + s_{55} + s_{66})} \tag{6.4.8}$$

Μέσος Hill- Μέση εκτίμηση:

Ο Hill (1952) έδειξε ότι η πραγματική συμπεριφορά των περισσότερων υλικών βρίσκεται μεταξύ τω δύο αυτών ορίων και πρότεινε τη μέση τιμή:

$$k_H = \frac{k_v + k_R}{2} \tag{6.4.9}$$

$$G_H = \frac{G_v + G_R}{2} \tag{6.4.10}$$

$$E_H = \frac{9K_H G_H}{3k_H + G_H} \tag{6.4.11}$$

$$v_H = \frac{3k_H - 2G_H}{2(3k_H + G_H)} \tag{6.4.12}$$

Κεφάλαιο 7: Δυναμική Προσομοίωση

Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό SolidWorks Simulation, μέσω ανάλυσης τύπου non-linear dynamic event, με στόχο τη μελέτη της συμπεριφοράς των τριών αυξητικών δομών σε σύγκριση με το συμβατικό απορροφητή υλικού EPP. Αρχικά επιχειρήθηκε όπως αναφέρεται παραπάνω, η ομογενοποίηση των κυψελωτών δομών με στόχο τη μείωση του υπολογιστικού κόστους των προσομοιώσεων.

Για το σκοπό αυτό, εξήχθησαν πίνακες δυσκαμψίας (stiffness matrix) που θα επέτρεπαν την αναπαράσταση των μηχανικών ιδιοτήτων κάθε δομής σε ένα ισοδύναμο συμπαγές δοκίμιο. Ωστόσο, κατά την διαδικασία εισαγωγής του ομογενοποιημένου υλικού στα λογισμικά προσομοίωσης προέκυψαν τεχνικές δυσκολίες.

Ως αποτέλεσμα δοκιμάστηκαν τρία διαφορετικά περιβάλλοντα, fusion 360, inventor Nastran και SolidWorks Simulation προκειμένου να εντοπιστεί το κατάλληλο λογισμικό για την εκτέλεση της δυναμικής ανάλυσης. Τελικά, επιλέχθηκε το SolidWorks, το οποίο επέτρεψε την προσομοίωση με μικρότερα δείγματα σε σχέση με το αρχικό σενάριο που είχε επιλεχθεί, με την δομή εσωτερικά τουλάχιστον των δύο δοκιμίων και όχι με ομογενοποιημένου συμπαγή όγκο σε όλα.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η διαδικασία ομογενοποίησης που αναπτύχθηκε στο προηγούμενο στάδιο, αποσκοπώντας σε διαφορετικό σενάριο, παραμένει ιδιαίτερα χρήσιμή, καθώς μπορεί να αξιοποιηθεί σε μελλοντικές προσομοιώσεις μεγαλύτερης κλίμακας, όπως ανάλυση ολόκληρου απορροφητή ενέργειας σε πραγματικές διαστάσεις σε λογισμικά όπως το Ansys και το Abaqus. Στα συγκεκριμένα λογισμικά είναι εφικτή η άμεση εισαγωγή του πλήρους πίνακα δυσκαμψίας (stiffness matrix), επιτρέποντας την μοντελοποίηση υλικών με κατευθηντικές ιδιότητες, δίνοντας την δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί αυτός ο ορισμός σε ανάλυση τύπου dynamic event.

Επιπλέον, στην παρούσα εργασία εκτός από την δυναμική ανάλυση θα πραγματοποιηθεί και στατική ανάλυση στο λογισμικό NTopology, με σκοπό την εκτίμηση της ακρίβειας και της αξιοπιστίας της μεθόδου ομογενοποίησης που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διαφορετικό σενάριο.

7.1 Σενάριο κρούσης

Ως αντιπροσωπευτικό δοκίμιο επιλέγεται απορροφητής ορθογωνικής διατομής διαστάσεων 108 x 70 x 100 mm (πλάτος, πάχος/διεύθυνση φόρτισης, ύψος). Η κρούση εφαρμόζεται κατά τον άξονα z, δηλαδή κάθετα στο πάχος 70 mm. Το σενάριο φόρτισης πραγματοποιείται με άκαμπτη πλάκα (rigid impactor) ίδιων διαστάσεων με την επιφάνεια του απορροφητή και πάχος 10 mm.

Ο απορροφητής θεωρείται πακτωμένος στο πίσω μέρος (fixed) , αναπαριστώντας τη σύνδεση του με την κύρια δοκό του προφυλακτήρα ενώ η άκαμπτη πλάκα περιορίζεται να μετακινητέ μόνο κατά μήκος του άξονα πρόσκρουσης. Το σενάριο αυτό αντιστοιχεί σε υπό κλίμακα προσομοίωσης (sub-scale model), όπου η μελέτη επικεντρώνεται στην απορρόφηση ενέργειας και στην ανάπτυξη τάσεων/παραμορφώσεων εντός του απορροφητή.

Το σενάριο επιλέχθηκε παρόμοιο με εκείνο που παρουσιάζεται στη σχετική βιβλιογραφία [69], όπου μελετήθηκε η συμπεριφορά απορροφητών ενέργειας σε συνθήκες χαμηλής ταχύτητας κρούσης (low speed impact). Συγκεκριμένα στο αναφερόμενο έργο πραγματοποιήθηκε υπό κλίμακα προσομοίωση και πειραματική δοκιμή, με στόχο την αποτύπωση της μηχανικής απόκρισης των δοκιμίων υπό δυναμική φόρτιση χαμηλής ταχύτητας.

Μάζα impactor (kg)	37.5
Ταχύτητα κρούσης (m/s)	1.05
Κινητική ενέργεια πρόσκρουσης (J)	20

Πίνακας 7.1.1 *Χαρακτηριστικά κρουστήρα.*

7.2 Μεθοδολογία και αποτελέσματα προσομοίωσης

Τα γεωμετρικά μοντέλα των δοκιμίων δημιουργήθηκαν στο λογισμικό Autodesk fusion 360 και κάθε μοντέλο εξήχθη σε μορφή STEP (.stp) αρχείου, ώστε να εισαχθεί στο περιβάλλον του SolidWorks ως ξεχωριστά σώματα

(Parts). Στην συνέχεια συνδυάστηκαν μέσω της επιλογής ‘Assembly’, ώστε να δημιουργηθεί το πλήρες σύστημα πρόσκρουσης, το οποίο αποτελείται από τον απορροφητή ενέργειας και τον impactor (rigid body).

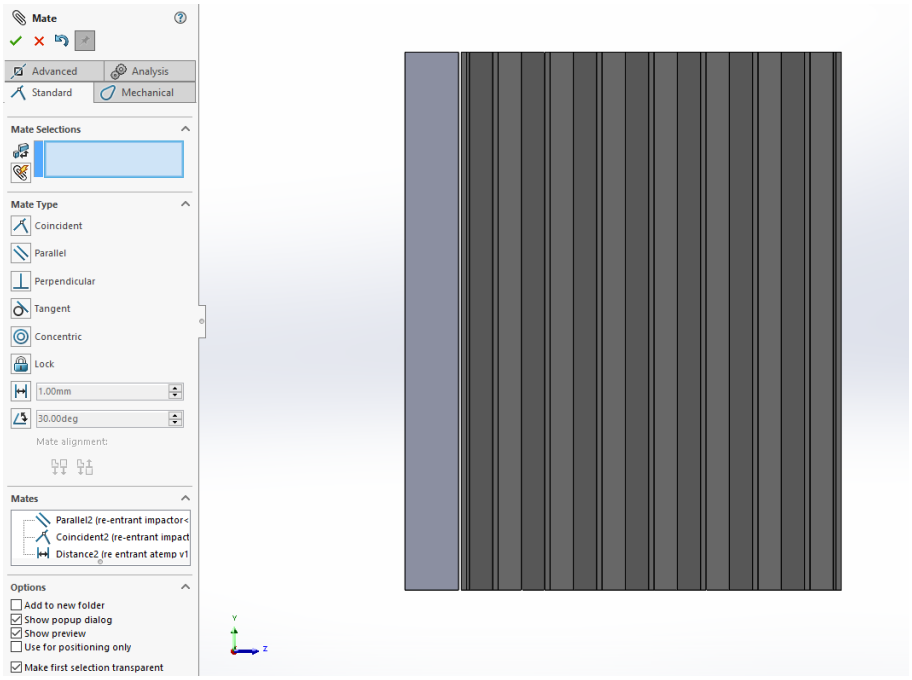
Μέσω του assembly επιτρέπεται η ρύθμιση μεταξύ των σχέσεων (mates) και ακριβή καθοδήγηση κάθε σώματος πριν την ανάλυση. Για κάθε διαμόρφωση ορίστηκε αρχική απόσταση 0.5 mm μεταξύ της εμπρόσθιας επιφάνειας του απορροφητή και της κάτω επιφάνειας του impactor. Η μικρή απόσταση μεταξύ των δύο σωμάτων αρχικά εξασφαλίζει ομαλή έναρξη της προσομοίωσης, επιτρέποντας στον solver να αναγνωρίσει σωστά την επαφή κατά την πρώτη χρονική στιγμή του non-linear dynamic event.

Η αρχική θέση του impactor τοποθετείται παράλληλα προς την ανώτερη επιφάνεια του απορροφητή και ευθυγραμμισμένη με τον άξονα φόρτισης, διασφαλίζοντας ότι η πρόσκρουση θα πραγματοποιηθεί με ομοιόμορφη κατανομή πίεσης στην επιφάνεια του δοκιμίου.

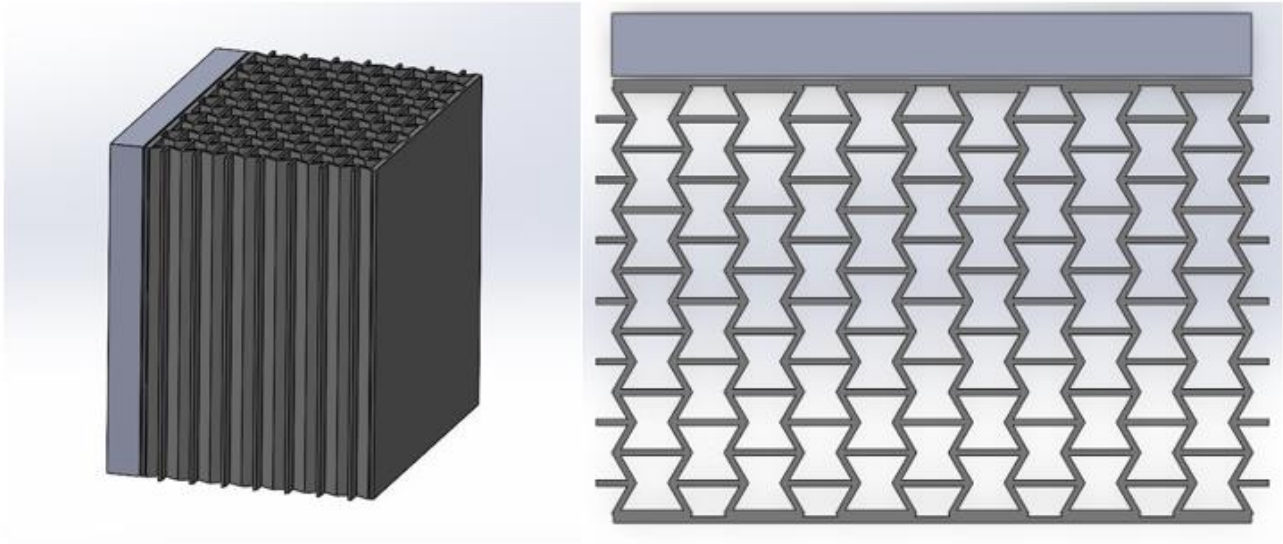
Κατά την ρύθμιση του assembly, εφαρμόστηκαν οι απαραίτητη περιορισμοί θέσης (mates):

- Coincident mate: Για την ευθυγράμμιση των επιπέδων συμμετρίας impactor-απορροφητή.
- Distance mate: Για τον ορισμό της αρχικής απόστασης μεταξύ των επιφανειών επαφής.
- Parallel mate: Για τη διατήρηση παράλληλης διάταξης των κύριων επιφανειών.

Η τελική διάταξη αποτελεί το αρχικό στάδιο του (setup) της προσομοίωσης και παρουσιάζεται στο (σχήμα 7.2.1) :



Σχήμα 7.2.1 *Ρύθμιση των συνθηκών ευθυγράμμισης μεταξύ του impactor και του απορροφητή στο περιβάλλον Assembly SolidWorks.*



Σχήμα 7.2.2 *Τελική τοποθέτηση του impactor με το δοκίμιο.*

7.2.1 Επιλογή τύπου προσομοίωσης και ορισμός υλικών

Μετά την ολοκλήρωση της γεωμετρικής διάταξης στο περιβάλλον Assembly, το επόμενο βήμα ήταν η επιλογή του κατάλληλου τύπου προσομοίωσης στο SolidWorks simulation. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω εφόσον εξετάζεται το δυναμικό φαινόμενο πρόσκρουσης, επιλέχθηκε ανάλυση τύπου non-linear dynamic event, η οποία επιτρέπει την επίλυση μη γραμμικών προβλημάτων που περιλαμβάνουν μεγάλες παραμορφώσεις, επαφές μεταξύ σωμάτων και χρονικά εξαρτώμενες δυνάμεις.

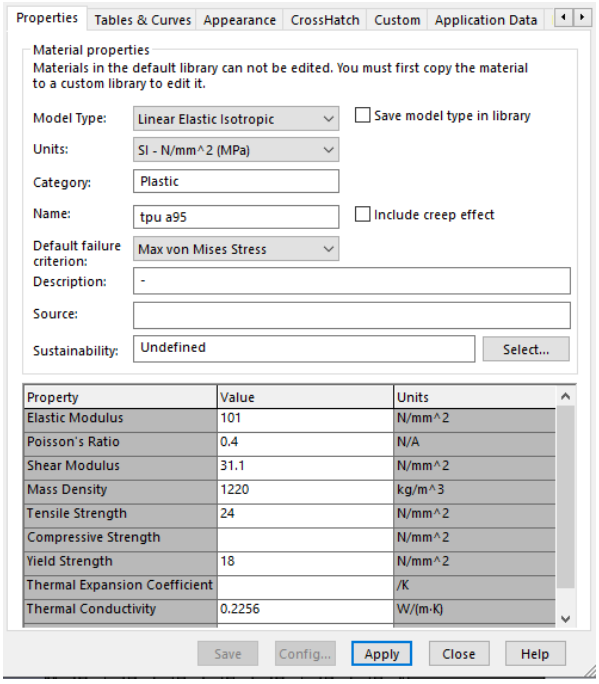
Στο αμέσως επόμενο στάδιο ορίστηκαν τα υλικά των σωμάτων που συμμετέχουν στην προσομοίωση.

- Impactor (rigid body): Ορίστηκε ως άκαμπτο σώμα (Rigid), χωρίς ιδιότητες παραμόρφωσης, προκειμένου να προσομοιωθεί ως αμετάβλητο στοιχείο που μεταφέρει πλήρως την κινητική ενέργεια στο δοκίμιο. Η επιλογή αυτή μειώνει το υπολογιστικό κόστος και εξασφαλίζει ότι όλη η απορρόφηση ενέργειας πραγματοποιείται από τον απορροφητή. Επιπλέον για να οριστεί το επιθυμητό βάρος, πραγματοποιήθηκε ρύθμιση της πυκνότητας του υλικού μέσα από το παράθυρο Material Properties, έτσι ώστε η συνολική μάζα του σώματος να αντιστοιχεί σε 37.5 kg. Η επαλήθευση γίνεται μέσω της εντολής Mass Properties, η οποία υπολογίζει αυτόματα το βάρος του μοντέλου με βάση τη γεωμετρία και την πυκνότητα.

	☒		Item	Mass (kg)
1	☒		re entrant atemp v1-3 (-tpu a95-)	0,25
2	☒		re-entrant impactor-1 (-re impactor-)	37,54

Σχήμα 7.2.1.1 *Mass properties*

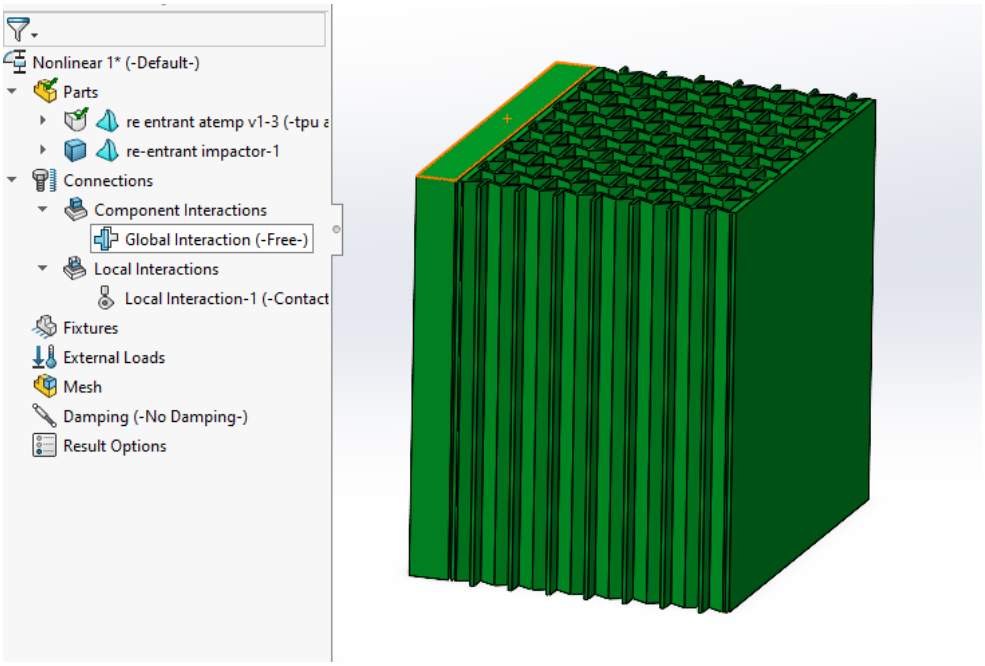
- Δοκίμια με αυξητικές δομές: Για κάθε αυξητική γεωμετρία δημιουργήθηκε προσαρμοσμένο υλικό (custom material) μέσω της εντολής edit material – custom material. Με τις ιδιότητες του υλικού που επιλέχθηκε TPU 95A όπως προέκυψε από τα δεδομένα της βιβλιογραφίας.



Σχήμα 7.2.1.2 *Ιδιότητες υλικού TPU 95A*

7.2.2 Ορισμός συνδέσμων (connections)

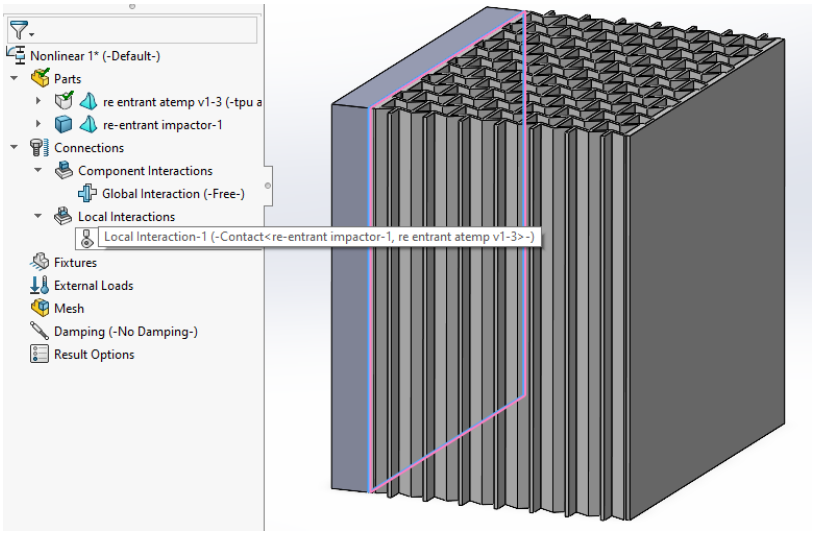
Στο περιβάλλον του SolidWorks τα connections καθορίζουν τον τρόπο με τον οποίο αλληλοεπιδρούν τα δύο σώματα μέσα στο assembly, επιτρέποντας τον προσδιορισμό της συνθήκης επαφής μεταξύ τους. Αρχικά τα δυο σώματα ορίζονται ως free μέσο του component interaction δηλαδή δεν έχουν καμία σύνδεση η επαφή μεταξύ τους πριν την έναρξη της ανάλυσης.



Σχήμα 7.2.2.1 *Τα σώματα δηλώνονται ως free μέσω του global interaction.*

Στην συνέχεια, χρησιμοποιήθηκε η εντολή Local interaction για τον ορισμό των επιφανειών που συμμετέχουν στην κρούση. Συγκεκριμένα, επιλέχθηκαν οι επιφάνειες της κάτω πλευράς του impactor και της άνω πλευράς του απορροφητή, και ορίστηκε τύπος επαφής contact με ρύθμιση frictionless. Η επιλογή αυτή επιτρέπει την

ανάπτυξη δυνάμεων αντίδρασης κατά τη σύγκρουση, αποτρέποντας την σύνδεση των σωμάτων και εξαλείφοντας πλευρικές ή διατμιτικές συνιστώσες που θα επηρέαζαν τεχνητά τα αποτελέσματα.

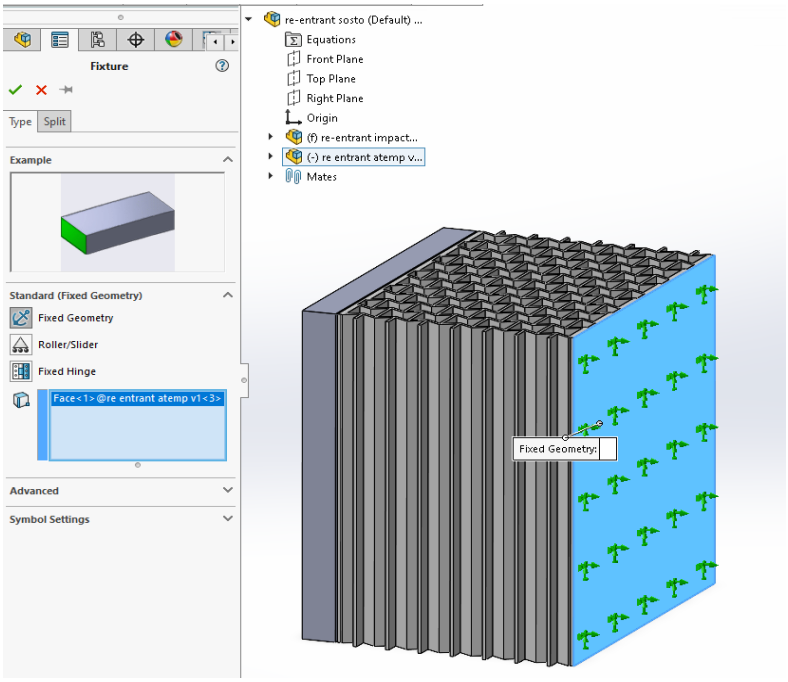


Σχήμα 7.2.2.2 *Εφαρμογή local interaction – contact και επιλογή τον επιφανειών impactor και απορροφητή που θα γίνει η πρόσκρουση.*

7.2.3 Οριακές συνθήκες και περιορισμοί (Fixtures)

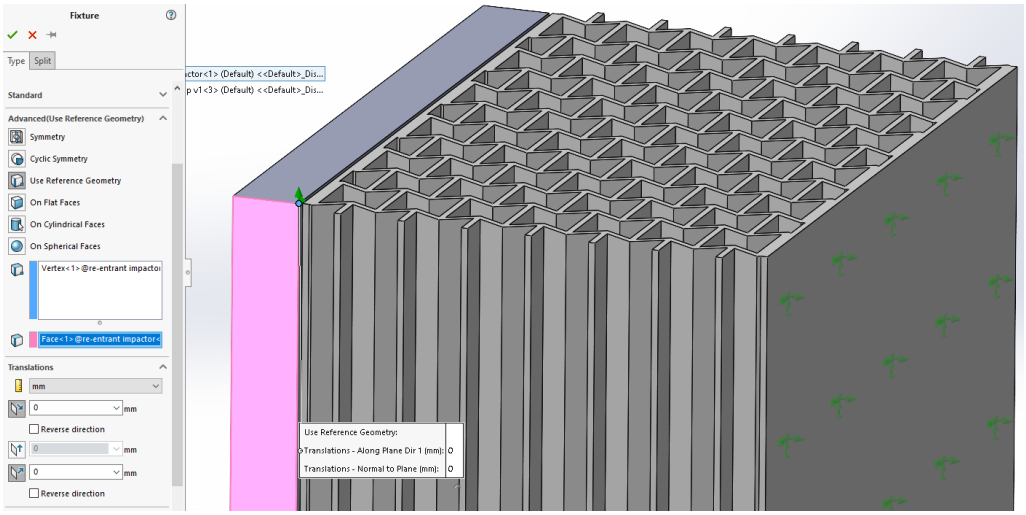
Οι οριακές συνθήκες καθορίζουν τον τρόπο με τον οποίο τα σώματα συγκρατούνται ή κινούνται στο χώρο κατά την διάρκεια της προσομοίωσης και αποτελούν κρίσιμο στάδιο για τη σωστή αναπαράσταση του φυσικού προβλήματος. Στην παρούσα ανάλυση ορίστηκαν δύο κύριες συνθήκες συγκράτησης και κίνησης, μία για τον απορροφητή ενέργειας και μία για τον impactor.

Η πίσω επιφάνεια του απορροφητή θεωρήθηκε πλήρως πακτωμένη (fixed geometry), ώστε να προσομοιωθεί η σύνδεση του με τη δοκό του προφυλακτήρα. Η εντολή fixed geometry, επιβάλει μηδενικές μετατοπίσεις και περιστροφές σε όλους του βαθμούς ελευθερίας των κόμβων της επιλεγμένης επιφάνειας, εξασφαλίζοντας ότι η ενέργεια της πρόσκρουσης απορροφάται αποκλειστικά από την δομή.



Σχήμα 7.2.3.1 *Εφαρμογή της συνθήκης Fixed Geometry στο πίσω μέρος του απορροφητή ενέργειας.*

Για τον impactor, εφαρμόστηκε συνθήκη μέσω της εντολής Advances Fixtures, η οποία επιτρέπει τον ακριβή έλεγχο των μετατοπίσεων και περιστροφών ανά άξονα. Συγκεκριμένα επιλέχθηκε η λειτουργεία Translation, όπου ενεργοποιήθηκε μόνο η μετακίνηση κατά τον άξονα φόρτισης, ενώ οι υπόλοιποι βαθμοί ελευθερίας τέθηκαν ως περιορισμένοι Fixed. Με αυτόν τον τρόπο ο impactor μπορεί να κινηθεί ελεύθερα μόνο κατά την κατεύθυνση πρόσκρουσης χωρίς να παρουσιάσει πλευρικές ή περιστροφικές αποκλίσεις.

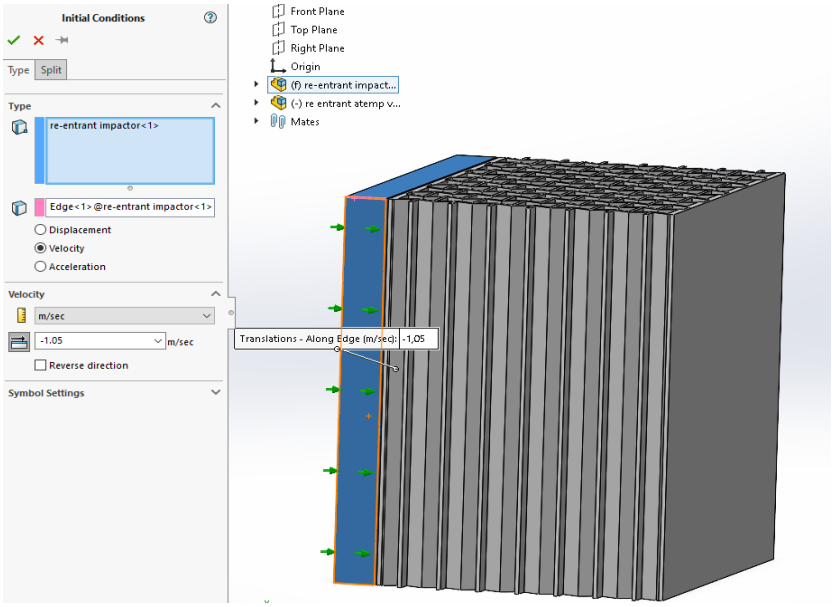


Σχήμα 7.2.3.2 *Ορισμός συνθήκης Advanced Fixture-Translation στον impactor, επιτρέποντας κίνηση μόνο κατά τον άξονα πρόσκρουσης.*

7.2.4 Ορισμός αρχικής ταχύτητας (initial condition)

Η αρχική ταχύτητα του impactor αποτελεί βασική παράμετρο της προσομοίωσης καθώς καθορίζει την ενέργεια της πρόσκρουσης και κατά συνέπεια το επίπεδο των αναπτυσσόμενων τάσεων και παραμορφώσεων του απορροφητή ενέργειας.

Ο ορισμός της αρχικής ταχύτητας πραγματοποιήθηκε μέσω της εντολής initial velocity που βρίσκεται στο μενού external loads και εφαρμόζεται αποκλειστικά στο σώμα του impactor η εντολή αυτή επιτρέπει τον καθορισμό είτε γραμμικής είτε περιστροφικής ταχύτητα ως αρχική συνθήκη για τη χρονική στιγμή t = 0. Ο impactor έλαβε γραμμική ταχύτητα u=1.05 m/s στην διεύθυνση πρόσκρουσης.



Σχήμα 7.2.4.1 *Ορισμός αρχικής ταχύτητας του impactor.*

7.2.5 Ορισμός απόσβεσης (Damping)

Η απόσβεση αποτελεί σημαντική παράμετρο σε δυναμικές αναλύσεις, καθώς επηρεάζει τη διάδοση και την εξασθένιση των ταλαντώσεων που αναπτύσσονται μετά την πρόσκρουση, συμβάλλοντας σε πιο ρεαλιστική συμπεριφορά της δομής και του υλικού. Στο SolidWorks η απόσβεση μπορεί να οριστεί μέσω του μοντέλου Rayleigh Damping, το οποίο περιγράφει τη συνολική μήτρα απόσβεσης ως γραμμικό συνδυασμό της μήτρας μάζας και μήτρας δυσκαμψίας του συστήματος.

$$C = \alpha M + \beta k \tag{7.2.5.1}$$

Όπου :

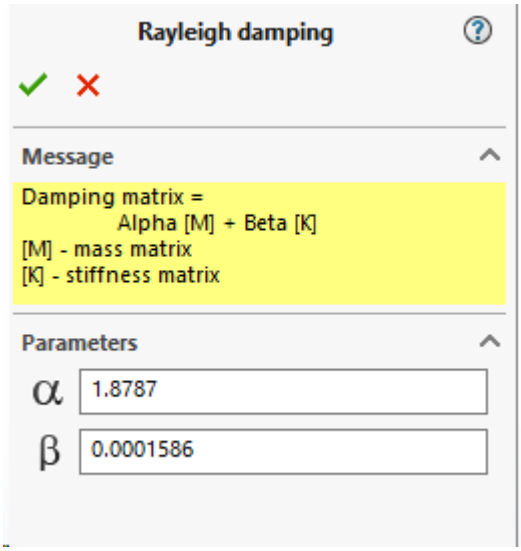
- α: Συντελεστής απόσβεσης μάζας (mass proportional damping coefficient)
- β: Συντελεστής απόσβεσης δυσκαμψίας (stiffness proportional damping coefficient)
- M και K: Μήτρες μάζα και δυσκαμψίας αντίστοιχα

Για την παρούσα ανάλυση, επιλέχθηκαν οι συντελεστές:

- α=1.8787
- β= 1.586 x 10^{-4}

Οι οποίες βασίζονται σε αντίστοιχες τιμές που έχουν χρησιμοποιηθεί στη βιβλιογραφία για TPU 95A σε ρητές δυναμικές προσομοιώσεις [89]. Οι τιμές αυτές αντιστοιχούν σε λόγο κρίσιμης απόσβεσης περίπου 4-5 % στο φάσμα συχνοτήτων 100-300 Hz, εξασφαλίζοντας ομαλή εξασθένιση των ταλαντώσεων μετά την πρόσκρουση χωρίς τεχνητή μείωση της απορροφούμενης ενέργειας.

Η εισαγωγή των παραμέτρων έγινε μέσω της εντολής Damping - Rayleigh Damping, με τα πεδία Mass Proportional (α) και Stiffness Proportional (β) να συμπληρώνονται με τις παραπάνω τιμές που φαίνονται στο (σχήμα 7.2.5.1).



Σχήμα 7.2.5.1 *Ενεργοποίηση του μοντέλου Rayleigh Damping.*

7.2.6 Ορισμός ιδιοτήτων μη γραμμικής δυναμικής ανάλυσης (Simulation Properties)

Για την σωστή αποτύπωση της συμπεριφοράς των δοκιμίων κατά τη διάρκεια της κρούσης, πραγματοποιήθηκε προσεκτικός ορισμός των παραμέτρων της μη γραμμικής δυναμικής ανάλυσης. Η προσομοίωση απαιτεί τη σωστή επιλογή του συνολικού χρόνου ανάλυσης (End Time) και του χρονικού βήματος ολοκλήρωσης (Time Step), ώστε να αποτυπωθεί με ακρίβεια η φάση επαφής, η μέγιστη συμπίεση και η επαναφορά της δομής.

Λόγω της υψηλής ελαστικότητας της δομής με υλικό TPU 95A, δοκιμάστηκαν διαφορετικές τιμές του τελικού χρόνου ανάλυσης για κάθε δοκίμιο, με στόχο να διασφαλιστεί ότι το φαινόμενο της κρούσης θα καλυφθεί ολόκληρο από τη στιγμή της επαφής μέχρι την πλήρη αποφόρτιση (αποκόλληση του impactor). Οι

τιμές του End Time κυμάνθηκαν μεταξύ 0.03 – 0.04 s, ανάλογα με την γεωμετρία της δομής και τον ρυθμό απορρόφησης ενέργειας, ώστε να καταγράφεται πλήρως η εξέλιξη των παραμορφώσεων.

7.2.3 Αποτελέσματα προσομοίωσης των δοκιμίων

Για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς κάθε δοκιμίου, πραγματοποιήθηκε ανάλυση των βασικών μεγεθών που προκύπτουν από την προσομοίωση κρούσης, εστιάζοντας στα διαγράμματα που περιγράφουν τη δυναμική απόκριση των δοκιμίων.

Παρουσιάζονται τα εξής διαγράμματα:

1. **Διάγραμμα δύναμης - χρόνου (Force-Time):**

Απεικονίζει την εξέλιξη της δύναμης που ασκείται στον απορροφητή κατά τη διάρκεια της κρούσης. Το μέγιστο σημείο της καμπύλης αντιστοιχεί στην μέγιστη αντίσταση της δομής, ενώ η μορφή της καμπύλης αποτυπώνει τον τρόπο με τον οποίο η δομή απορροφά και αποδεσμεύει ενέργεια. Μετριέται στην πίσω επιφάνεια (Fixed Face) του δοκιμίου, καθώς δίνονται πληροφορίες όπως το μέγιστο φορτίο που μεταφέρεται στο αμάξωμα.

2. **Διάγραμμα μετατόπισης - χρόνου (Displacement – Time):**

Παρουσιάζει την χρονική μεταβολή της μετατόπισης στο ανώτερο σημείο του δοκιμίου (σημείο επαφής με τον impactor). Από την καμπύλη προσδιορίζεται το μέγιστο βάθος παραμόρφωσης και η χρονική στιγμή της μέγιστης συμπίεσης.

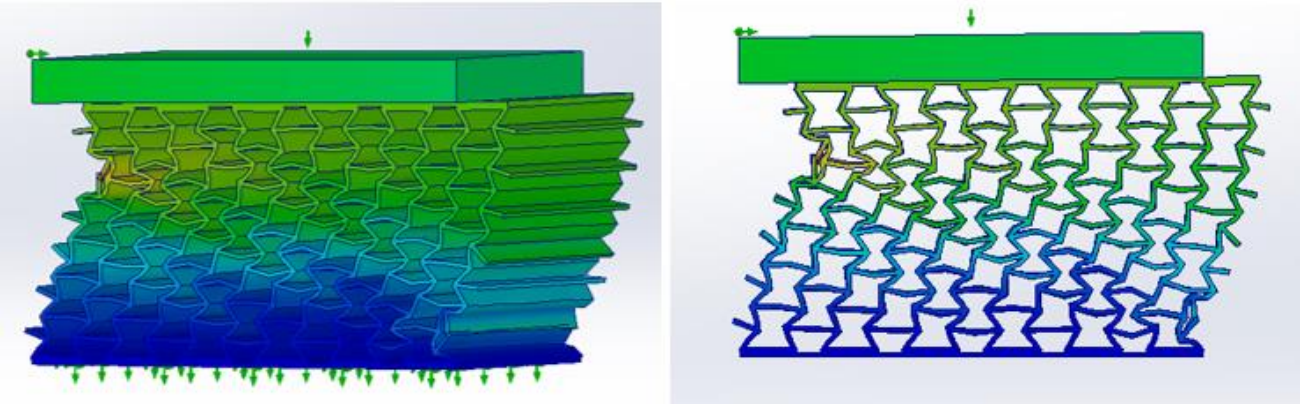
3. **Διάγραμμα Τάσης – Χρόνου (Von Mises Stress – Time):**

Δείχνει την μεταβολή της τάσης σε χαρακτηριστικό σημείο της δομής, παρέχοντας πληροφορίες για τις χρονικές φάσεις όπου εμφανίζονται οι μέγιστες τοπικές καταπονήσεις. Επιλέγεται εσωτερικό node κοντά στην εμπρόσθια περιοχή.

4. **Διάγραμμα Δύναμης – Μετατόπισης (Force – Displacement):**

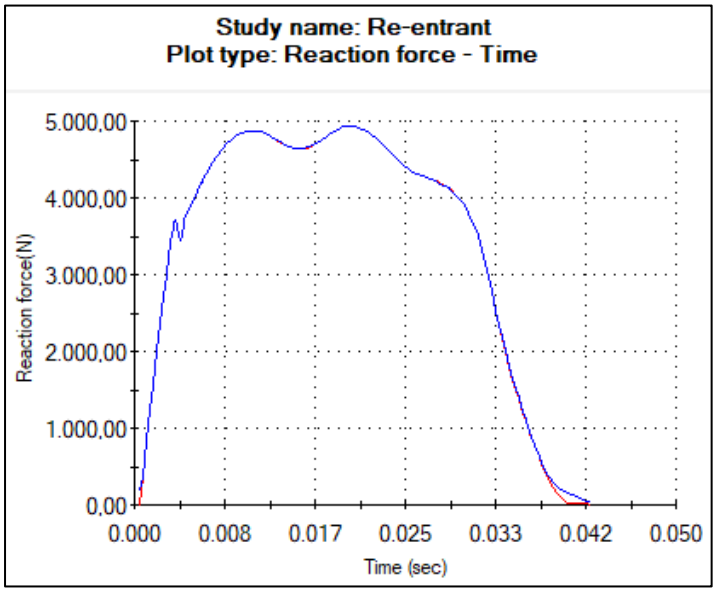
Από το διάγραμμα αυτό προκύπτει το έργο της δύναμης κατά την παραμόρφωση, δηλαδή η ενέργεια απορρόφησης του δοκιμίου. Το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη αντιπροσωπεύει την ενέργεια που διαχέεται μέσω της παραμόρφωσης. Είναι συνδυασμός αποτελεσμάτων Δύναμης –Χρόνου (Force – Time) από την πίσω επιφάνεια (reaction) και Μετατόπισης – Χρόνου (Displacement – Time) από την εμπρόσθια επιφάνεια (Contact). Γίνεται export σε csv αρχείο και δημιουργείται το διάγραμμα στο excel και καταγράφεται το μηχανικό

7.2.3.1 Αποτελέσματα δομής Re-entrant



Σχήμα 7.2.3.1.1 Απεικόνιση της μέγιστης παραμόρφωσης της δομής Re-entrant.

1. **Διάγραμμα δύναμης - χρόνου (Force-Time):**



Σχήμα 7.2.3.1.2 *Διάγραμμα Δύναμης – Μετατόπισης της δομής Re-entrant.*

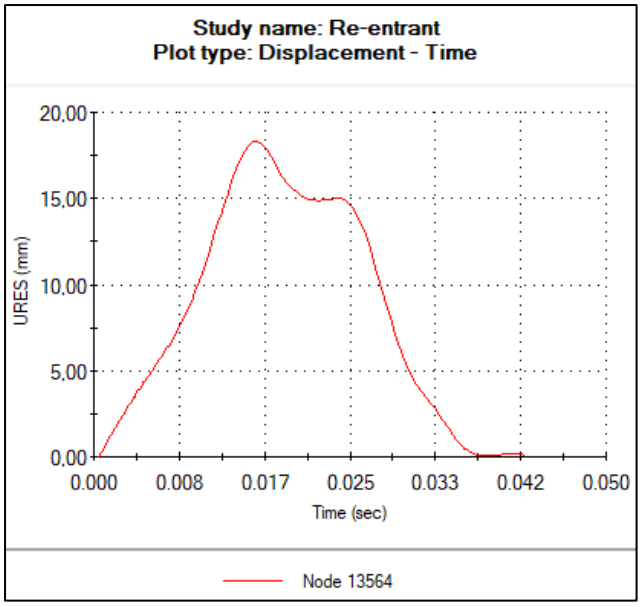
Από το διάγραμμα (σχήμα 7.2.3.1.1) παρατηρείται αρχικά απότομη αύξηση της δύναμης κατά τα πρώτα 0.005s, η οποία αντιστοιχεί στην φάση αρχικής επαφής και ενεργοποίησης της γεωμετρικής παραμόρφωσης των κυψελών. Στην συνέχεια η δύναμη σταθεροποιείται σε επίπεδα περίπου 4.5 – 5 KN για χρονικό διάστημα έως 0.028 s, σχηματίζοντας ένα σχεδόν οριζόντιο 'πλατώ' (plateau) όπου θεωρείται ιδιαίτερα σημαντικό σε εφαρμογές απορρόφησης ενέργειας.

Η μέγιστη δύναμη που αναπτύσσεται είναι F_{MAX} = 4929.4 N την χρονική στιγμή t = 0.019 και η μέση δύναμη κατά την διάρκεια της επαφής υπολογίστηκε στα F_{MEAN} = 3447.52 N. Ο λόγος μέσης προς μέγιστη δύναμη (Crash Force Efficiency – CFE) προκύπτει:

$$CFE = \frac{F_{MEAN}}{F_{MAX}} = \frac{3447.52}{4929.4} = 0{,}7 = 70\% \qquad (7.2.3.1.1)$$

Γεγονός που υποδηλώνει σχετικά σταθερή μεταφορά φορτίου χωρίς έντονη αιχμή δύναμης. Μετά τα 0.028s παρατηρείται απότομη μείωση της δύναμης, κατά την οποία υπάρχει επαναφορά και απώλεια φόρτισης συμβατή με την ολοκλήρωση της συμπίεσης.

2. **Διάγραμμα μετατόπισης - χρόνου (Displacement – Time):**



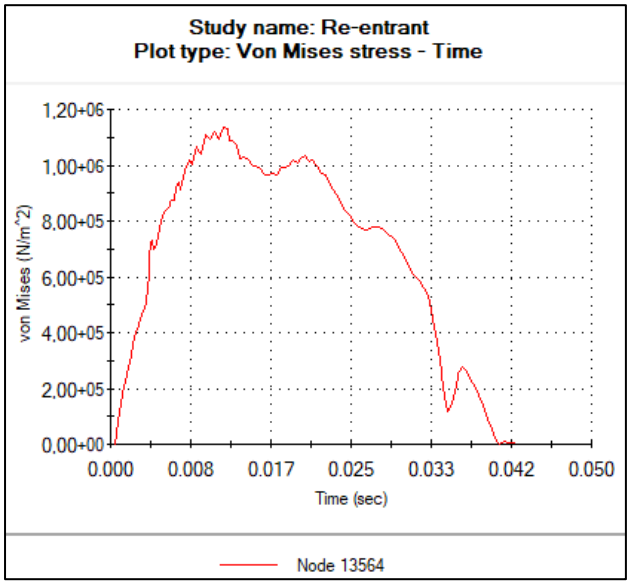
Σχήμα 7.2.3.1.3 *Διάγραμμα Μετατόπισης – Χρόνου της δομής Re-entrant.*

Στο (σχήμα 7.2.3.1.3) παρουσιάζεται η χρονική εξέλιξη της μετατόπισης (URES) του κόμβου παρακολούθησης (Node 13564) που βρίσκεται στην πάνω επιφάνεια του δοκιμίου της δομής Re-entrant. Η μετατόπιση αυξάνεται γρήγορα αμέσως μετά την έναρξη της κρούσης, φτάνοντας σε μέγιστη τιμή 18.31 mm την χρονική στιγμή t = 0.0156 s, που αντίστοιχή στην φάση μέγιστης συμπίεσης – παραμόρφωσης της δομής. Το αρχικό πάχος του δοκιμίου στην κατεύθυνση φόρτισης είναι 70 mm, συνεπώς με την μέγιστη μετατόπιση που καταγράφθηκε (18.31 mm) αντιστοιχεί σε συνολικό λόγο συμπίεσης περίπου 26%.

Στην συνέχεια παρατηρείται σταδιακή μείωση της μετατόπισης έως σχεδόν μηδενικές τιμές προς το τέλος της προσομοίωσης t = 0.042, υποδηλώνοντας σημαντική ελαστική ανάκτηση (rebound) του συστήματος η οποία είναι συμβατή με την ελαστική απόκριση του υλικού TPU 95A που χρησιμοποιήθηκε.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι το TPU 95 A προσεγγίστηκε ως γραμμικά ελαστικό υλικό, συνεπώς η προβλεπόμενη ανάκτηση μετατόπισης ενδέχεται να είναι αυξημένη σε σχέση με την πραγματική συμπεριφορά, για τον λόγο αυτό τα αποτελέσματα αξιοποιούνται κυρίως για συγκριτική αξιολόγηση της γεωμετρίας υπό κοινές παραδοχές.

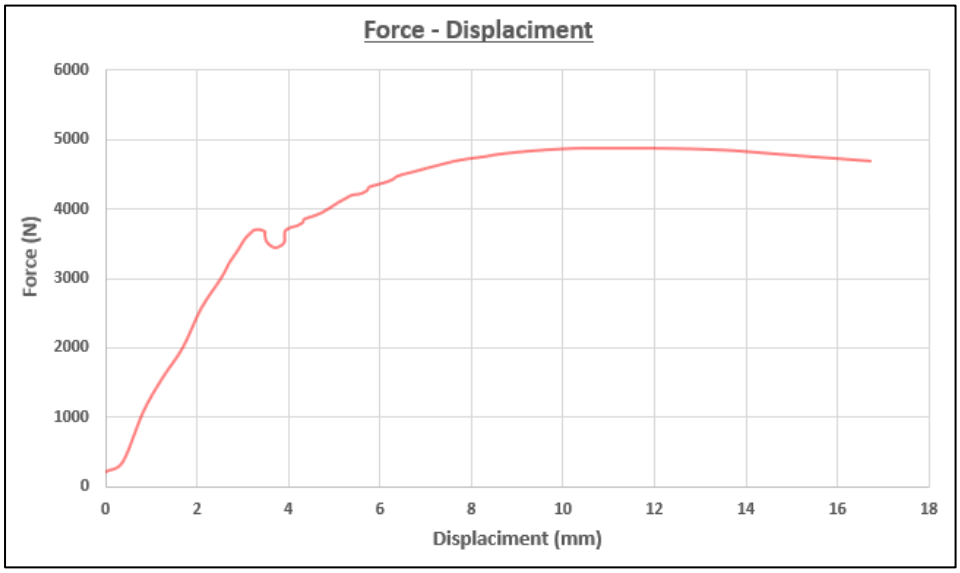
3. Διάγραμμα Τάσης – Χρόνου (Von Mises Stress – Time):



Σχήμα 7.2.3.1.4 *Διάγραμμα Von Mises Stress –Χρόνου της δομής Re-entrant.*

Στο (σχήμα 7.2.3.1.4) παρουσιάζεται η χρονική εξέλιξη της ισοδύναμης τάσης Von Mises για τον κόμβο παρακολούθησης (Node 13564) στην δομή Re-entrant. Παρατηρείται μέγιστη τιμή σ_{MAX} = 1.13 MPa την χρονική στιγμή t =0.0117 s. Η μέση τιμή τις ισοδύναμης τάσης κατά την διάρκεια της προσομοίωσης υπολογίστηκε περίπου σ_{MEAN} = 0.68 MPa.

4. Διάγραμμα Δύναμης – Μετατόπισης (Force – Displacement):



Σχήμα 7.2.3.1.5 *Διάγραμμα Δύναμης – Μετατόπισης της δομής Re-entrant.*

Το διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης (σχήμα 7.2.3.1.5) χρησιμοποιείται για τη μελέτη της μηχανικής απόκρισης του δοκιμίου και τις εξέλιξης της επαφής κατά την διάρκεια της κρούσης. Μέσω του διαγράμματος αυτού είναι δυνατή η ποιοτική και ποσοτική αξιολόγηση της δυσκαμψίας του συστήματος και της αλληλεπίδρασης μεταξύ κρουστήρα και δοκιμίου.

Η μηχανική απόκριση της δομής re-entrant κατά την διάρκεια της κρούσης μπορεί να εκτιμηθεί μέσω του ολοκληρώματος της δύναμης ως προς τη μετατόπιση, το οποίο αντιστοιχεί στο μηχανικό έργο που αναπτύσσεται κατά την φάση της φόρτισης, συνεπώς:

$$E_{Load} = \int_0^{Xmax} F(x)\,\mathrm{d}x \tag{7.2.3.1.2}$$

Στα δεδομένα που εξήχθησαν από το λογισμικό SolidWorks σε μορφή csv η ολοκλήρωση πραγματοποιείται με τον κανόνα του τραπεζίου :

$$E_{load} \approx \sum_{i=1}^{n} \frac{F_{i-1} + F_i}{2}(x_i - x_{i-1}) \tag{7.2.3.1.3}$$

Η διαδικασία εφαρμόστηκε στο Excel με υπολογισμό του έργου κάθε υπό-διαστήματος και άθροισμά έως το σημείο της μέγιστης μετατόπισης. Για το συγκεκριμένο δοκίμιο υπολογίστηκε:

$$E_{load} \approx 75.9J \tag{7.2.3.1.4}$$

Η τιμή αυτή αντιστοιχεί στο μηχανικό έργο που απαιτείται ώστε το δοκίμιο να μεταφερθεί από την αρχική κατάσταση στο μέγιστο επίπεδο παραμόρφωσης το οποίο είναι 18,313 mm και όχι στην καθαρή απορροφούμενη ενέργεια.

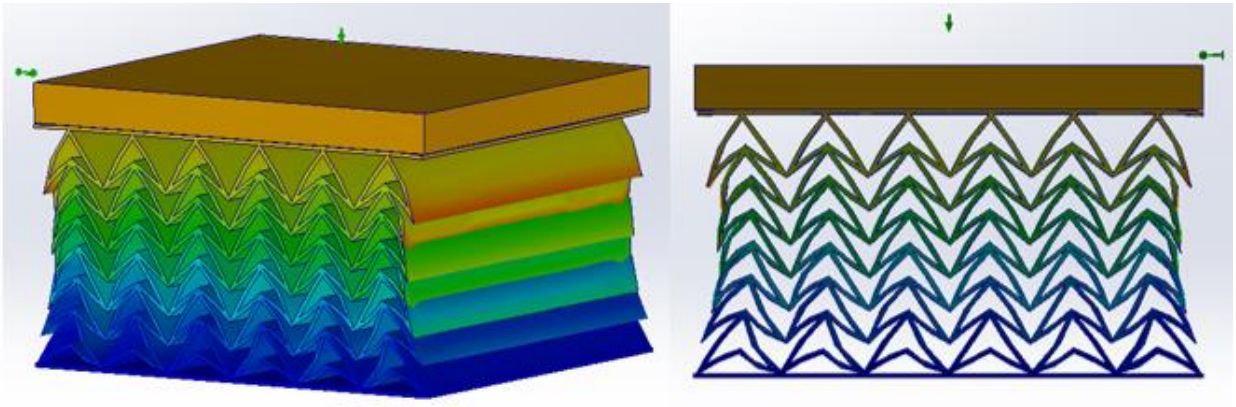
Μετά τη μέγιστη παραμόρφωση παρατηρείται αναπήδηση (rebound) του impactor, γεγονός που υποδηλώνει ότι σημαντικό μέρος της ενέργειας επιστρέφει στο σύστημα. Το άκαμπτο σώμα (rigid body) έχει αρχική ταχύτητα 1.05 m/s και τελική ταχύτητα στο τέλος της κρούσης 0.95 m/s προ την αντίθετη κατεύθυνση. Η καθαρή απορρόφηση ενέργειας υπολογίζεται από την μείωση της κινητικής ενέργειας του impactor εφόσον υπάρχει rebound μετά την κρούση:

$$E_{abs} = \frac{1}{2} m\left(u_{in}^2 - u_{out}^2\right) \tag{7.2.3.1.5}$$

Όπου u_{out} είναι η ταχύτητα του κρουστήρα μετά την πλήρη αποκόλληση και u_{in} η ταχύτητα λίγο πριν την κρούση. Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης προκύπτει:

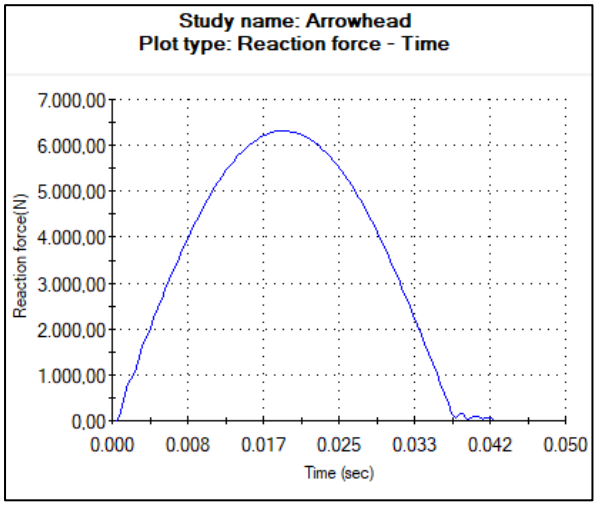
$$E_{abs} = 3{,}6\ J \tag{7.2.3.1.6}$$

7.2.3.2 Αποτελέσματα δομής Arrowhead



Σχήμα 7.2.3.2.1 *Απεικόνιση της μέγιστης παραμόρφωσης της δομής Arrowhead.*

1. **Διάγραμμα δύναμης – χρόνου (Force – Time):**



Σχήμα 7.3.3.2.2 *Διάγραμμα Δύναμης – Χρόνου της δομής Arrowhead.*

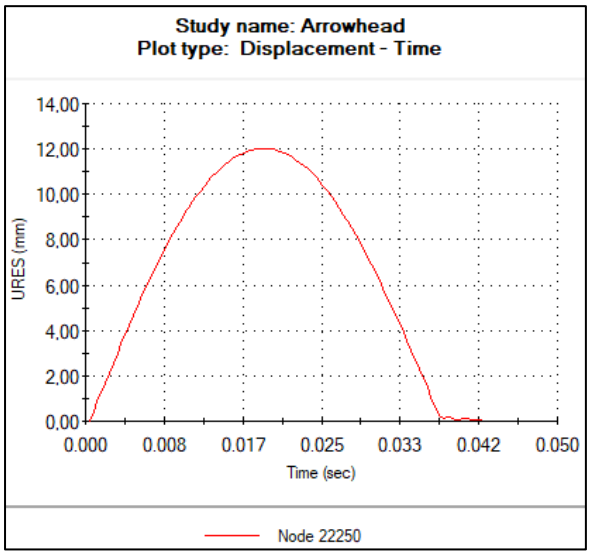
Η αντίδραση στην βάση του δοκιμίου χρησιμοποιήθηκε ως δείκτης μεταδιδόμενου φορτίου ως προς το στήριγμα. Από το διάγραμμα δύναμης – χρόνου της δομής Arrowhead (σχήμα 7.3.3.2.2), παρατηρείται ότι η μέγιστη τιμή που παρουσιάζει είναι F_{MAX} = 6316.1 N σε χρόνο t = 0,0189 s, χωρίς την εμφάνιση πλατώ (plateau)

σε σύγκριση με την δομή Re-entrant και στην συνέχεια ακολουθεί μια ομαλή αποφόρτιση. Η διάρκεια σημαντικής φόρτισης είναι από (0,00084 – 0.040) δηλαδή 0,039 s και η μέση δύναμη F_{MEAN} = 3885.36 N. Ο λόγος μέσης προς μέγιστη δύναμη (Crash Force Efficiency – CFE) προκύπτει:

$$CFE = \frac{F_{MEAN}}{F_{MAX}} = \frac{3885.6}{6316.1} = 0{,}615 = 61.5\% \quad (7.2.3.2.1)$$

Η χαμηλότερη τιμή CFE σε σύγκριση με την δομή Re-entrant (CFE = 70%) υποδηλώνει μεγαλύτερη αιχμή δύναμης και λιγότερο ομαλή μεταφορά φορτίου κατά την κρούση.

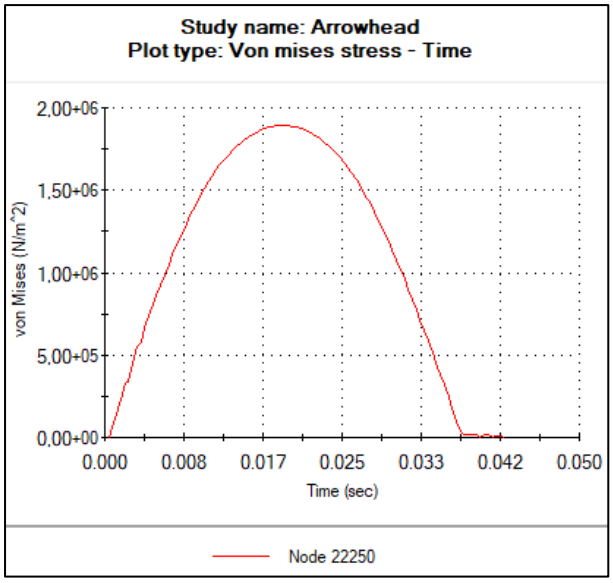
2. **Διάγραμμα μετατόπισης - χρόνου (Displacement – Time):**



Σχήμα 7.2.3.2.3 *Διάγραμμα Μετατόπισης – Χρόνου της δομής Arrowhead.*

Η μέγιστη τιμή της μετατόπισης κατά τη φάση συμπίεσης (σχήμα 7.2.3.2.3) είναι 12,05 mm στην χρονική στιγμή t = 0,0189 s και στην συνέχεια μειώνεται κατά την αποφόρτιση, με την μετατόπιση να επιστρέφει σχεδόν σε μηδενικές τιμές περίπου την χρονική στιγμή t = 0,0378 s. Το αποτέλεσμα όπως και στην δομή re-entrant δηλώνει σημαντική επαναφορά (rebound), και επιπλέον η μέγιστη παραμόρφωση αντιστοιχεί σε περίπου 17% του διαθέσιμου πάχους των 70 mm. Η μικρότερη παραμόρφωση σε σχέση με την δομή Re-entrant σε συνδυασμό με την υψηλότερη αιχμή δύναμης υποδηλώνει αυξημένη δυσκαμψία της γεωμετρίας Arrowhead

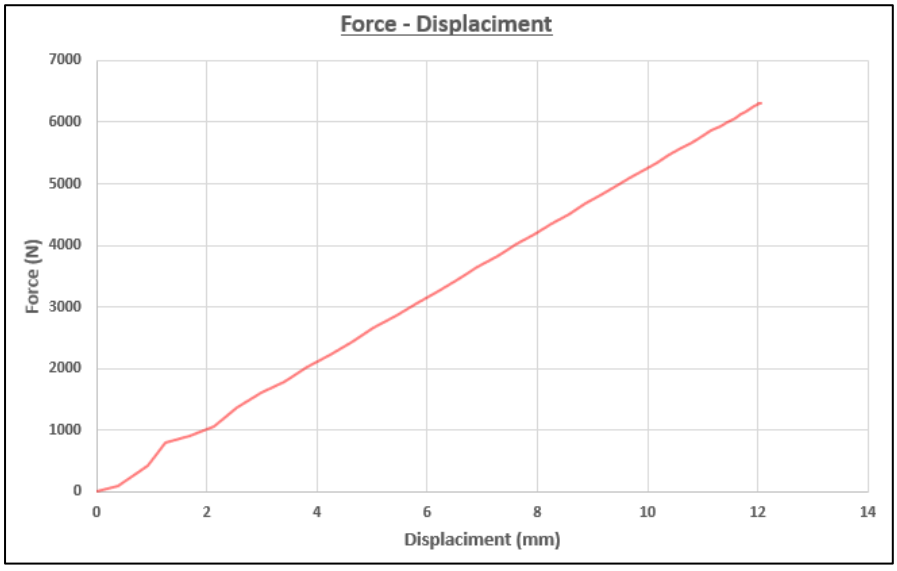
3. **Διάγραμμα Τάσης – Χρόνου (Von Mises Stress – Time):**



Σχήμα 7.2.3.2.4 *Διάγραμμα Von Mises Stress – Χρόνου της δομής Arrowhead.*

Στο (σχήμα 7.2.3.2.4) παρουσιάζεται η χρονική εξέλιξη της ισοδύναμης τάσης von Mises για την δομή Arrowhead. Παρατηρείται ότι η τάση έχει μέγιστη τιμή σ_{MAX} = 2.02 MPa την χρονική στιγμή t = 0.0189 s, χρονική στιγμή που συμπίπτει με το μέγιστο μεταδιδόμενο φορτίο reaction force και τη μέγιστη μετατόπιση και η μέση τάση είναι σ_{MEAN} = 1.17 MPa .Στη συνέχεια η τάση μειώνεται κατά την αποφόρτιση και τείνει σε πρακτικά μηδενικές τιμές προς το τέλος της κρούσης (t = 0,04 s).

4. Διάγραμμα Δύναμης – Μετατόπισης (Force – Displacement):



Σχήμα 7.2.3.2.5 *Διάγραμμα Δύναμης – Μετατόπισης της δομής Arrowhead.*

Το διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης (σχήμα 7.2.3.2.5) χρησιμοποιείται όπως αναφέρθηκε και παραπάνω για την ποιοτική αξιολόγηση της ακαμψίας και του μηχανισμού φόρτισης της δομής. Παρατηρείται ότι η σχεδόν γραμμική αύξηση της δύναμης με την μετατόπιση και η απουσία plateau υποδηλώνουν ότι η arrowhead δομή δεν ενεργοποιεί μηχανισμό προοδευτικής σύνθλιψης.

Η μηχανική απόκριση της δομής Arrowhead αξιολογήθηκε μέσω της ανάλυσης του διαγράμματος δύναμης μετατόπισης που προέκυψε από την προσομοίωση κρούσης. Η μέγιστη μετατόπιση του δοκιμίου ήταν 12.05 mm, και το έργο που αναπτύσσεται κατά την φάση φόρτισης είναι:

$$E \approx 38{,}19J$$

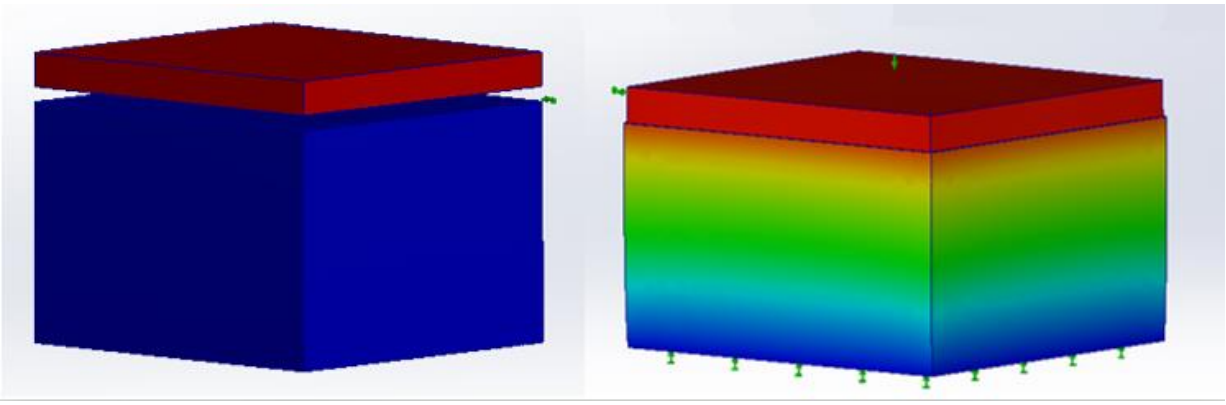
(7.2.3.2.2)

Λόγω της έντονης ελαστικής επαναφοράς , η καθαρή απορροφημένη ενέργεια υπολογίστηκε με την μεταβολή της κινητικής ενέργειας του impactor πριν και μετά την κρούση:

$$E_{abs} = 2.47J$$

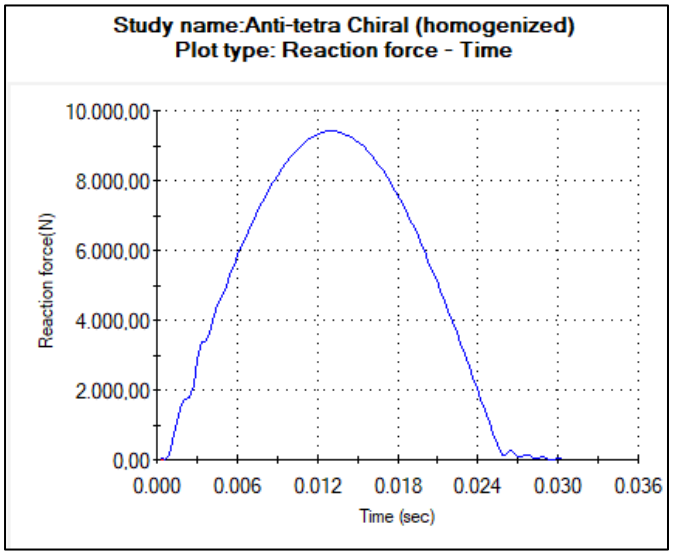
(7.2.3.2.3)

7.2.3.3 Αποτελέσματα δομής Anti-tetra chiral



Σχήμα 7.2.3.3.1 *Απεικόνιση της μέγιστης παραμόρφωσης της ομογενοποιημένης δομής Anti-tetra Chiral.*

1. **Διάγραμμα Δύναμης – Χρόνου (Force – Time):**



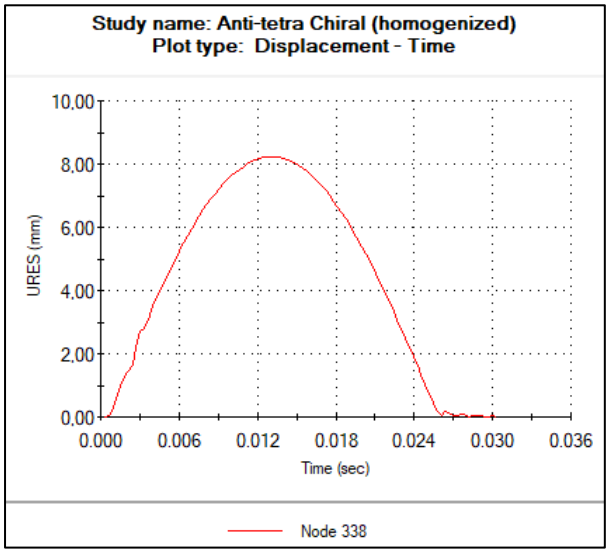
Σχήμα 7.2.3.3.*2* *Διάγραμμα Δύναμης – Χρόνου της δομής Anti-tetra Chiral (homogenization).*

Στο διάγραμμα δύναμης - χρόνου (σχήμα 7.2.3.3.2) για την δομή Anti-tetra Chiral ομογενοποιημένου μοντέλου, η δύναμη αυξάνεται ταχέως από την έναρξη της επαφής έως την μέγιστη τιμή F_{MAX} = 9412.9 N την χρονική στιγμή t = 0.0129 s, τιμή σημαντικά υψηλότερη σε σύγκριση με τις προηγούμενες γεωμετρίες. Η μέση δύναμη κατά τη διάρκεια της επαφής είναι F_{MEAN} = 5399.47 N. Συνεπώς ο λόγος μέσης προς μέγιστη δύναμη (Crash Force Efficiency – CFE) προκύπτει:

$$CFE = \frac{F_{MEAN}}{F_{MAX}} = \frac{5399.47}{9412.9} = 0{,}574 = 57.4\%$$

(7.2.3.3.1)

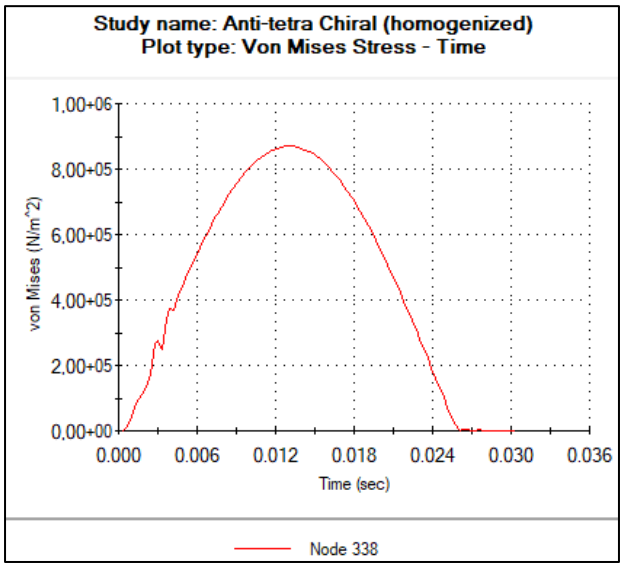
Η τιμή αυτή είναι χαμηλότερη από εκείνη της δομής Re-entrant (0.70) και Arrowhead (0.61), αποτυπώνοντας μεγαλύτερη αιχμή φόρτισης και μεταφορά φορτίου κατά την κρούση.



Σχήμα 7.2.3.3.*3* *Διάγραμμα Μετατόπισης – Χρόνου της δομής Anti-tetra Chiral (homogenization).*

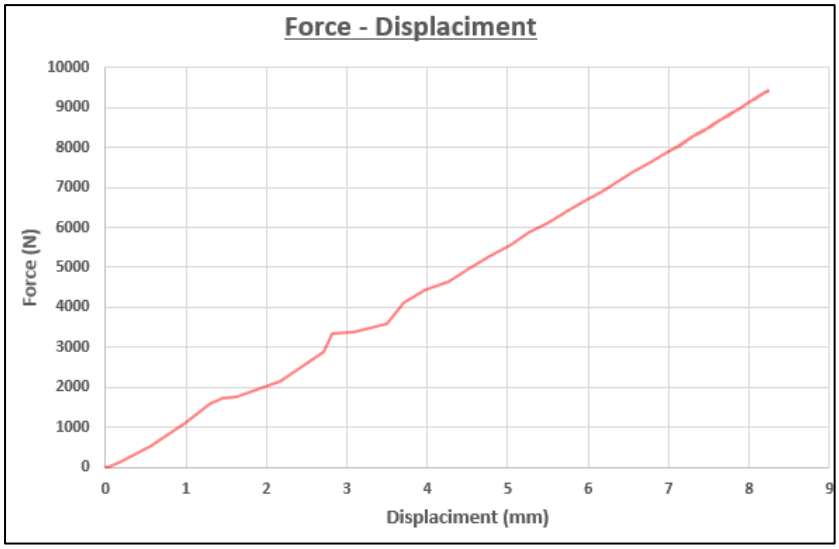
Στο διάγραμμα μετατόπισης - χρόνου (σχήμα 7.2.3.3.3) παρουσιάζεται η χρονική εξέλιξη της μετατόπισης του κόμβου (Node 338) που βρίσκεται στο κέντρο της πάνω επιφάνειας του δοκιμίου. Η μετατόπιση αυξάνεται από την έναρξη της επαφής έως την μέγιστη τιμή 8.23 mm την χρονική στιγμή t = 0.019 s, η οποία συμπίπτει με την εμφάνιση της μέγιστης δύναμης στο αντίστοιχο διάγραμμα δύναμης χρόνου.

Μετά την μέγιστη μετατόπιση, παρατηρείται η μείωση τις τιμής έως σχεδόν μηδενικά επίπεδα στο τέλος του συμβάντος, με τελική μετατόπιση περίπου 0.02 mm. Σε συνδυασμό με την υψηλή μέγιστη δύναμη, το ομογενοποιημένο υλικό εμφανίζει πιο συμπαγή και δύσκαμπτη δυναμική απόκριση.



Σχήμα 7.2.3.3.*4* *Διάγραμμα Von Mise Stress – Χρόνου της δομής Anti-tetra Chiral (homogenization).*

Στο διάγραμμα ισοδύναμης τάσης Von Mises – χρόνου (σχήμα 7.2.3.3.4) παρουσιάζεται η χρονική εξέλιξη της τοπικής τάσης στο (Node 338) του ομογενοποιημένου μοντέλου. Η τάση αυξάνετε από την έναρξη της επαφής έως τη μέγιστη τιμή σ_{MAX} = 0.87 MPa την χρονική στιγμή t = 0.129 s και μειώνεται σταδιακά έως σχεδόν μηδενικά επίπεδα.



Σχήμα 7.2.3.3.5 *Διάγραμμα Δύναμης – Μετατόπισης της δομής Anti-tetra Chiral (homogenization).*

Στο διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης (σχήμα 7.2.3.3.5) αποτυπώνεται η μηχανική απόκριση του ομογενοποιημένου μοντέλου Anti-tetra chiral κατά την δυναμική κρούση. παρόμοια με την δομή Arrowhead, η δύναμη αυξάνεται προοδευτικά με τη μετατόπιση, χωρίς εμφάνιση εκτεταμένου πλατώ, έως την μέγιστη τιμή και επιστρέφει στο αρχικό του μήκος.

Το έργο συμπίεσης (έργο φόρτισης) έως την μέγιστη μετατόπιση υπολογίστηκε όπως τα προηγούμενα δοκίμια μέσω της ολοκλήρωσης της καμπύλης, με τον κανόνα του τραπεζίου στα διακριτά δεδομένα που εξήχθησαν από το SolidWorks, και προέκυψε:

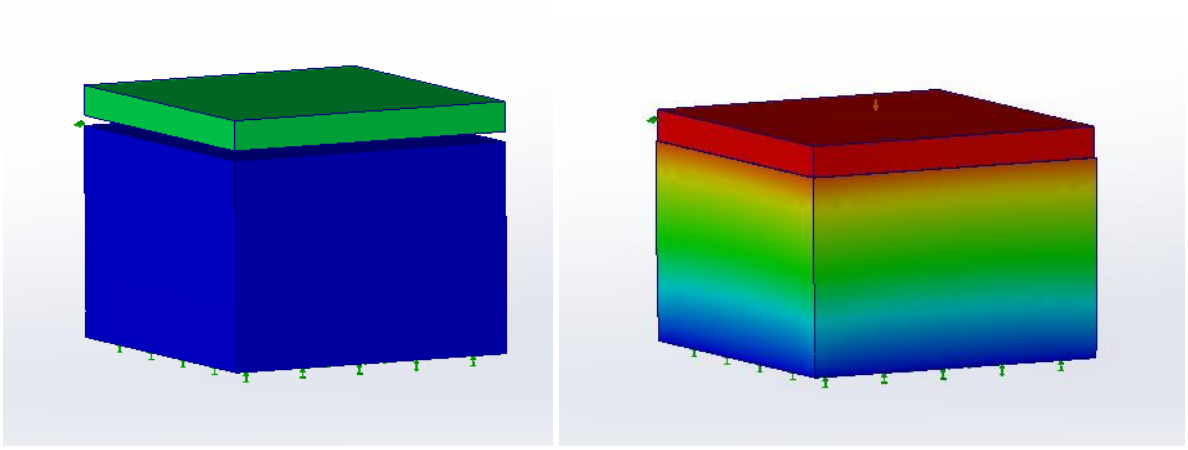
$$E \approx 37{,}67J \tag{7.2.3.3.2}$$

Η τιμή αυτή εκφράζει το μηχανικό έργο που αναπτύσσεται κατά την φάση συμπίεσης μέχρι την μέγιστη παραμόρφωση και αντίστοιχή στην ενέργεια που μεταφέρεται προσωρινά στο σύστημα, κυρίως ως ελαστική.

Λόγω της έντονης ελαστικής επαναφοράς, η καθαρή απορροφημένη ενέργεια υπολογίστηκε με την μεταβολή της κινητικής ενέργειας του impactor πριν και μετά την κρούση:

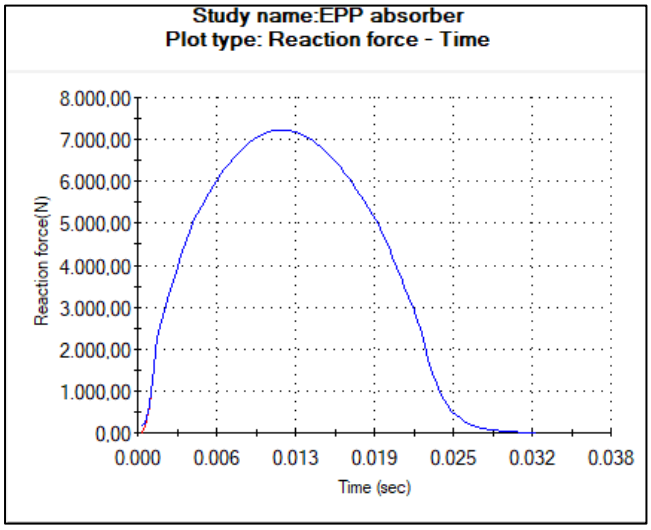
$$E_{abs} = 1.97J \tag{7.2.3.3.2}$$

7.2.3.4 Αποτελέσματα υλικού EPP (Expanded Polypropylene)



Σχήμα 7.2.3.4.1 *Απεικόνιση της μέγιστης παραμόρφωσης του υλικού EPP.*

1. **Διάγραμμα δύναμης – χρόνου (Force – Time):**

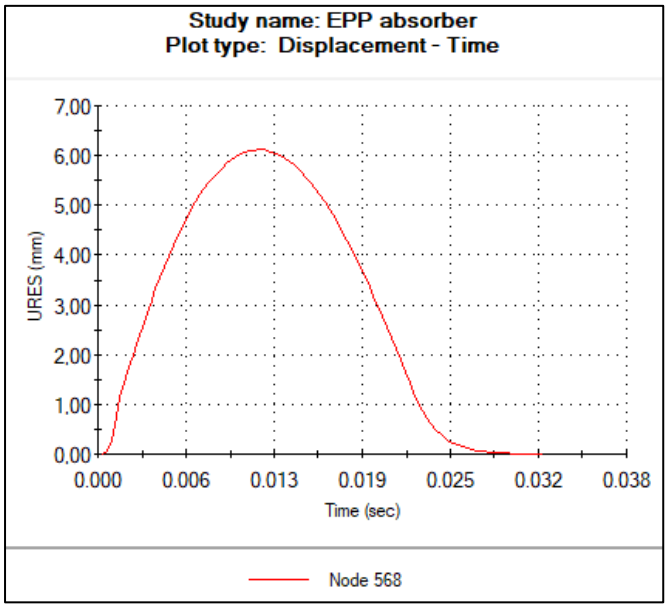


Σχήμα 7.2.3.4.2 *Διάγραμμα Δύναμης – Χρόνου του δοκιμίου EPP.*

Στο διάγραμμα δύναμης χρόνου (σχήμα 7.2.3.4.2) για το δοκίμιο από υλικό EPP παρουσιάζεται η χρονική εξέλιξη της αντίδρασης κατά την διάρκεια της δυναμικής κρούσης. Η δύναμη αυξάνεται προοδευτικά από την έναρξη της επαφής και φτάνει στην μέγιστη τιμή F_{MAX} = 7231.4 N την χρονική στιγμή t = 0.01152 s και στην συνέχεια μειώνεται σε μηδενικά επίπεδα. Η μέση δύναμη κατά την διάρκεια της επαφής υπολογίστηκε F_{MEAN} = 3938.92 N, και συνεπώς ο δείκτης Crash Efficiency (CFE) προκύπτει:

$$CFE = \frac{F_{MEAN}}{F_{MAX}} = \frac{3938.92}{7231.4} = 0{,}545 = 54.5\% \qquad (7.2.3.4.1)$$

2. **Διάγραμμα μετατόπισης - χρόνου (Displacement – Time):**

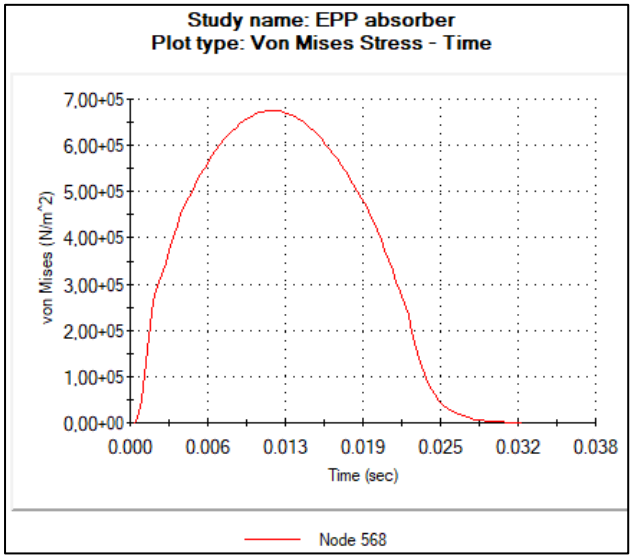


Σχήμα 7.2.3.4.3 *Διάγραμμα Μετατόπισης – Χρόνου του δοκιμίου EPP.*

Στο διάγραμμα μετατόπισης – χρόνου (σχήμα 7.2.3.4.3) φαίνεται χρονικά πως παραμορφώνεται το δοκίμιο

EPP κατά την διάρκεια της δυναμικής κρούσης της. Η μετατόπιση φτάνει την μέγιστη τιμή 6.12 mm την χρονική στιγμή t = 0.011 s στο σημείο κορύφωσης της μηχανικής φόρτισης. Σε σύγκριση με τα δοκίμια TPU, το EPP εμφανίζει μικρότερη μέγιστη μετατόπιση, λόγο μεγαλύτερης αρχικής αντίστασης στην συμπίεση.

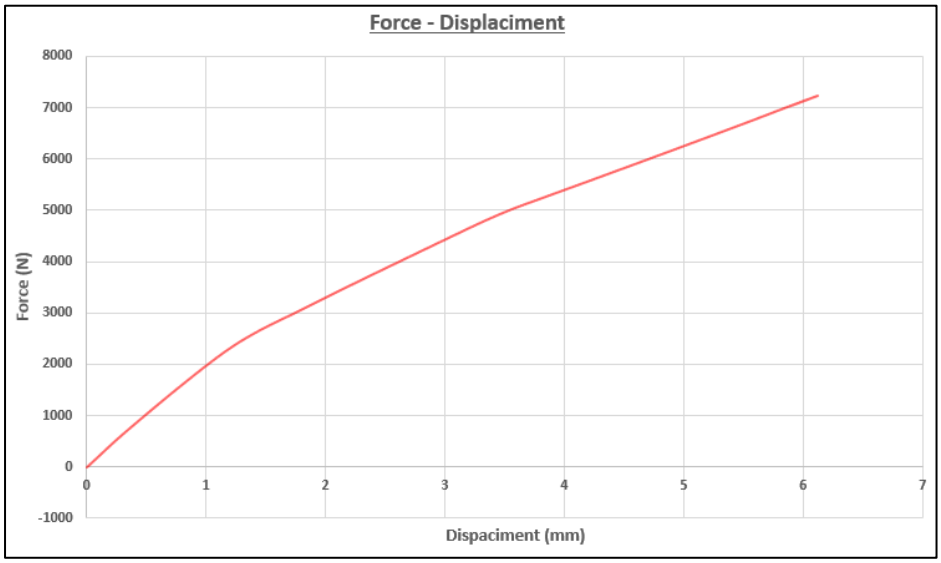
3. Διάγραμμα Τάσης – Χρόνου (Von Mises Stress – Time):



Σχήμα 7.2.3.4.4 *Διάγραμμα Von Mises Stress – Χρόνου του δοκιμίου EPP.*

Στο διάγραμμα von mises stress – χρόνου (σχήμα 7.2.3.4.4) για το δοκίμιο EPP παρατηρείται κατά την έναρξη της κρούσης μέγιστη τιμή τάσης σ_{MAX} = 0.67 MPa την χρονική στιγμή t = 0.0125 s.

4. Διάγραμμα Δύναμης – Μετατόπισης (Force – Displacement):



Σχήμα 7.2.3.4.5 *Διάγραμμα Δύναμης – Μετατόπισης του δοκιμίου EPP.*

Στο διάγραμμα δύναμης μετατόπισης (σχήμα 7.2.3.4.5) αποτυπώνεται η μηχανική απόκριση του δοκιμίου υλικού EPP, και υπολογίζεται το έργο συμπίεσης (έργο φόρτισης). Με τον κανόνα του τραπεζίου στα διακριτά δεδομένα που εξήχθησαν από το SolidWorks, προέκυψε:

$$E \approx 26J$$

(7.2.3.4.2)

Το σημαντικό έργο συμπίεσης σε συνδυασμό με την μικρή μέγιστη μετατόπιση καταδεικνύει την ικανότητα του υλικού EPP να απορροφάει μηχανικό έργο σε περιορισμένο μήκος παραμόρφωσης.

Η καθαρή απορροφούμενη ενέργεια υπολογίστηκε με την μεταβολή της κινητικής ενέργειας του impactor πριν και μετά την κρούση, όπου παρατηρείται σημαντική μείωση της τελικής ταχύτητας σε σχέση με την αρχική χωρίς υψηλή αναπήδηση (rebound). Συγκεκριμένα η αρχική ταχύτητα είναι u_{in} = 1.05 m/s και η τελική u_{out} = 0.62 m/s, συνεπώς η απορροφούμενη ενέργεια ανέρχεται:

$$E_{abs} = 13.22\, J$$

(7.2.3.4.2)

7.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων

Η συγκριτική αξιολόγηση των τεσσάρων δοκιμίων πραγματοποιήθηκε με βάση τους δείκτες που σχετίζονται με δυναμική απόκριση στην κρούση και την απορρόφησης ενέργειας, οι οποίοι είναι:

- Μέγιστη δύναμη (F_{MAX}).
- Ποσοστό Παραμόρφωσης προς το αρχικό πάχος.
- Crash Force Efficiency (CFE)
- Έργο παραμόρφωσης E_{LOAD}
- Απορρόφηση ενέργειας E_{ABS}

Στον πίνακα 7.3.1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των τεσσάρων δοκιμίων και οι τιμές σε κάθε δείκτη αξιολόγησης:

Δοκίμιο	Μέγιστη δύναμη F_{MAX} (N)	Ποσοστό παραμόρφωσης (%)	Crush Force Efficiency (CFE)	Έργο παραμόρφωσης - E_{LOAD} (J)	Απορρόφηση ενέργειας E_{ABS} (J)
Re-entrant	4929.4	26	70	75.9	3.6
Arrowhead	6316	17	61.5	38.9	2.4
Anti-tetra chiral (homogenization)	9.412	11.7	57.4	37.6	1.97
EPP absorber	7231.4	8.74	54.5	26	13.22

Πίνακας 7.3.1 *Σύγκριση αποτελεσμάτων.*

Η μέγιστη δύναμη αποτελεί κρίσιμο δείκτη αξιολόγησης της δυναμικής συμπεριφοράς ενός απορροφητή ενέργειας, καθώς συνδέεται με το μέγιστο φορτίο που μεταφέρεται στο σύστημα και συγκεκριμένα στο αμάξωμα. Από τα αποτελέσματα η δομή Re-entrant παρουσιάζει μικρότερη αιχμή δύναμης μεταξύ των εξεταζόμενων δοκιμίων, με τιμή F_{MAX} = 4929.4 N, γεγονός που υποδηλώνει αποτελεσματικότερη γεωμετρική διαχείριση του φορτίου κατά την κρούση.

Το ομογενοποιημένο δοκίμιο της δομής Anti-tetra Chiral εμφανίζει την μεγαλύτερη τιμή F_{MAX} = 9.412 N, σχεδόν διπλάσια σε σχέση με την Re-entrant, ενώ τα δοκίμια Arrowhead και EPP βρίσκονται ενδιάμεσα με (6316 N και 7231.4 N αντίστοιχα).

Η διαφοροποιήσεις οφείλονται στον τρόπο με τον οποίο κάθε δοκίμιο ενεργοποιεί τους μηχανισμούς παραμόρφωσης. Από τις προσομοιώσεις παρατηρείται ότι η δομή Re-entrant παραμορφώνεται μέσω έντονης περιστροφής των κυψελωτών μονάδων και κάμψης των δοκών. Αυτή η κινηματική ελευθερία επιτρέπει ανακατανομή των τάσεων με αποτέλεσμα να μειώνει το μέγιστο φορτίο που μετριέται στο πίσω μέρος του δοκιμίου.

Παράλληλα, η δομή Arrowhead, οδηγείται σε περιορισμένη περιστροφική κινηματική, καθώς τα λοξά στοιχεία ενεργοποιούνται ταχύτερα στην κρούση και αναπτύσσουν μεγαλύτερη αξονική δυσκαμψία, γεγονός που αυξάνει την αρχική αντίσταση και την μέγιστη δύναμη σε σχέση με την Re-entrant.

Στην περίπτωση της ομογενοποιημένης δομής Anti-tetra Chiral, η αυξημένη τιμή της μέγιστης δύναμης δεν συνδέεται αποκλειστικά με την γεωμετρική μορφή της κυψελωτης διάταξης, αλλά και με την μεθοδολογία που ακολουθήθηκε. Η προσέγγιση αυτή, ενδέχεται να μην αποδίδει πλήρως τους τοπικούς μηχανισμούς περιστροφής και κάμψης με αποτέλεσμα να υπάρχουν αποκλείσεις σε σχέση με την κανονική γεωμετρία.

Το δοκίμιο EPP, παρότι δεν βασίζεται σε auxetic γεωμετρία, παρουσιάζει διαφορετικό μηχανισμό διαχείρισης του φορτίου, με την παραμόρφωση να πραγματοποιείτε μέσω κατάρρευσης των κυψελών του αφρώδες υλικού. Ο μηχανισμός αυτός δεν στηρίζεται σε περιστροφική κινηματική αλλά σε κυψελωτή σύνθλιψη, η οποία ενεργοποιείτε προοδευτικά με την αύξηση της φόρτισης.

Το ποσοστό παραμόρφωσης εκφράζει το λόγο της μέγιστης μετατόπισης προς το αρχικό πάχος (70 mm) και αποτελεί δείκτη του βαθμού αξιοποίησης της διαθέσιμης διαδρομής συμπίεσης κατά την κρούση. Η δομή που εμφανίζει το μεγαλύτερο ποσοστό είναι η Re-entrant, αξιοποιώντας το μεγαλύτερο μέρος της διαθέσιμης διαδρομής.

Ο δείκτης Crush Force Efficiency (CFE) εκφράζει τον λόγο μέσης δύναμης προς την μέγιστη δύναμη κατά την διάρκεια της κρούσης. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή CFE, τόσο ποιο σταθερή είναι η μεταφορά του φορτίου. Από τα αποτελέσματα η δομή Re-entrant εμφανίζει την υψηλότερη τιμή, επιτυγχάνοντας την καλύτερη διαχείριση σε σχέση με τα υπόλοιπα δοκίμια.

Όσο αναφορά το έργο φόρτισης και την ενέργεια απορρόφησης στα TPU παρατηρείται μεγάλη απόκλιση μεταξύ E_{LOAD} και E_{ABS}. Η συμπεριφορά αυτή συνδέεται με το ότι το TPU προσεγγίστηκε ως γραμμικά ελαστικό υλικό (linear elastic material), με αποτέλεσμα το μεγαλύτερο μέρος του έργου που αναπτύσσεται κατά την συμπίεση να αποθηκεύετε ως ελαστική παραμόρφωση (ενέργεια) και να ανακτάται κατά την αποφόρτιση (rebound). Παρότι εφαρμόστηκε απόσβεση τύπου Raileigh Dumbing, δεν αναπαριστά πλήρως τους μηχανισμούς που χαρακτηρίζουν ένα υπερρεαλιστικό – ιξωδοελαστικό υλικό.

Όμως, παρά τον περιορισμό τα αποτελέσματα μπορούν να αξιοποιηθούν συγκριτικά εφόσον η ίδια υλική παραδοχή εφαρμόστηκε σε λες τις γεωμετρίες TPU. Με τον τρόπο αυτό, οι αποκλίσεις που παρατηρούνται μεταξύ των δοκιμίων αποδίδονται κυρίως στη γεωμετρική τους διαμόρφωση και στους αντίστοιχους μηχανισμούς παραμόρφωσης και όχι σε διαφοροποίηση υλικής συμπεριφοράς. Αντίθετα, για την εκτίμηση της πραγματικής ενέργειας που απορροφήθηκε, κριτήριο αποτελεί η μεταβολή της κινητικής ενέργειας του impactor, μέσω του E_{ABS}, το οποίο αποτυπώνει το μη ανακτήσιμο μέρος της εισερχόμενης ενέργειας.

Συνεπώς μεταξύ TPU γεωμετριών, η Re-entrant παρουσιάζει υψηλότερο έργο φόρτισης, γεγονός που συνδέεται με το μεγαλύτερο ποσοστό παραμόρφωσης και την αυξημένη ικανότητα αποθήκευσης ελαστικής ενέργειας. Ωστόσο, η καθαρή απορρόφηση ενέργειας παραμένει περιορισμένη, όπως και στις υπόλοιπες γεωμετρίες TPU, λόγο του ότι το μεγαλύτερο μέρος της εισερχόμενης ενέργειας αποθηκεύεται και ανακτάται, με αποτέλεσμα περιορισμένη καθαρή απορρόφηση και έντονο φαινόμενο αναπήδησης. Αντίθετα, το δοκίμιο EPP παρουσίασε σημαντικά υψηλότερη απορρόφηση ενέργειας $E_{ABS} = 13.22$ J, καθώς το αφρώδης υλικό οδηγεί σε μη ανακτήσιμες απώλειες και μείωση της τελικής κινητικής ενέργειας.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, οι auxetic γεωμετρίες- και ιδιαίτερα η Re-entrant και η Arrowhead, εμφανίζουν σημαντικά πλεονεκτήματα ως προς τη ρύθμιση της δυναμικής απόκρισης, με μειωμένη μέγιστη δύναμη και καλύτερο συντελεστή Crush Force Efficiency (CFE), που σημαίνει ελεγχόμενη μεταφορά φορτίου κατά την κρούση.

Σε σύγκριση με το δοκίμιο EPP, οι auxetic δομές προσφέρουν δυνατότητα ρυθμίζεις της δυσκαμψίας και άλλων μηχανικών ιδιοτήτων μέσω γεωμετρικού σχεδιασμού, παρέχοντας ευελιξία ως προς το έλεγχο της κατανομής των τάσεων και των μέγιστων δυνάμεων. Με βάση τα παρόντα αποτελέσματα οι αυξητικές δομές Re-entrant και Arrowhead υπερέχουν ως προς την διαχείριση του φορτίου ωστόσο για την εκτίμηση της καθαρής απορρόφησης ενέργειας χρειάζεται η εφαρμογή του κατάλληλου υπερελαστικού ή ιξωδοελαστικού μοντέλου που θα επέτρεπε πιο ρεαλιστική αποτίμηση ώστε να συγκριθεί με το δοκίμιο EPP.

Κεφάλαιο 8: Στατική Προσομοίωση Στο Λογισμικό N-topology

Στο παρόν κεφάλαιο πραγματοποιείται η συγκριτική στατική ανάλυση των τριών δοκιμίων του απορροφητή με αυξητική δομή (Re-entrant, Arrowhead, Anti-tetra chiral), εστιάζοντας στην αξιολόγηση της ομογενοποιημένης προσομοίωσης έναντι της πλήρους γεωμετρικής ανάλυσης. Η σύγκριση αυτή αποσκοπεί στην αξιολόγηση της αξιοπιστίας του ομογενοποιημένου μοντέλου, προκειμένου να διερευνηθεί η δυνατότητα χρήσης του σε μελλοντικές μελέτες, οπού η πλήρης γεωμετρική προσομοίωση ενδέχεται να είναι υπολογιστικά απαιτητική.

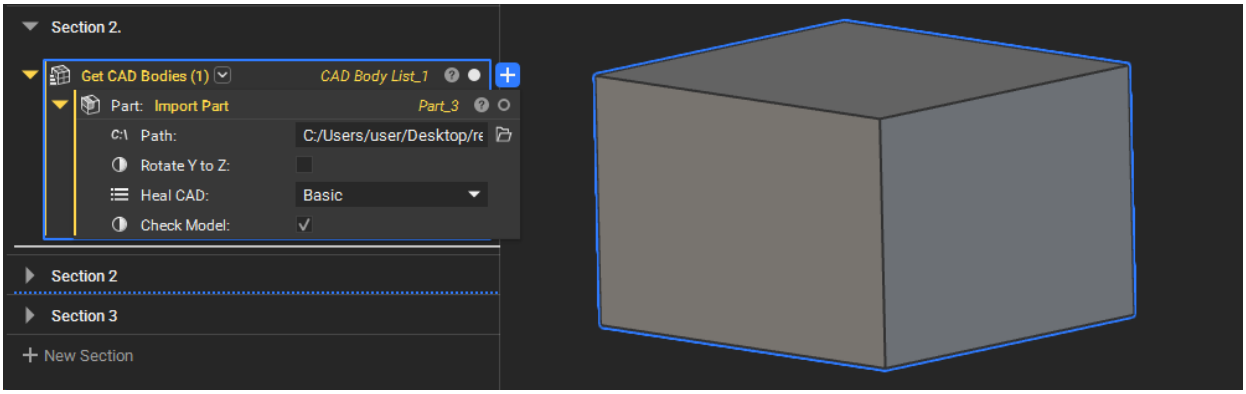
Η σύγκριση επικεντρώνεται κυρίως στην τελική παραμόρφωση των δοκιμίων υπό την εφαρμογή συγκεκριμένου στατικού φορτίου, αξιολογώντας τη διαφορά στη μετατόπιση μεταξύ των δυο προσεγγίσεων. Η τελική αξονική μετατόπιση χρησιμοποιείτε ως βασικό κριτήριο σύγκρισης, καθώς αποτελεί άμεσο δείκτη της ισοδύναμης δυσκαμψίας της δομής και επιτρέπει ποσοτική εκτίμηση της απόκλισης μεταξύ της ομογενοποίησης και τις πραγματικής γεωμετρικής αναπαράστασης.

8.1 Μεθοδολογία Μοντελοποίησης και ανάλυσης ομογενοποιημένου υλικού

Η διαδικασία ομογενοποίησης της μοναδιαίας κυψέλης έχει αναλυθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο συνεπώς στο παρών στάδιο αξιοποιείται το παραγόμενο ομογενοποιημένο υλικό για την ανάπτυξη του μοντέλου. Συγκεκριμένα, στο ίδιο αρχείο στο οποίο πραγματοποιήθηκε η ομογενοποίηση της κυψέλης δημιουργήθηκε νέο section, εντός του οποίου εισήχθη συμπαγές δοκίμιο (box) ίδιων γεωμετρικών διαστάσεων με το αντίστοιχο δοκίμιο της πλήρους δομής. Στο δόκιμο αυτό ανατέθηκαν οι ισοδύναμες μηχανικές ιδιότητες του υλικού και εφαρμόστηκαν οι συνοριακές συνθήκες και φορτίσεις.

1. Εισαγωγή Γεωμετρίας Δοκιμίου (Box)

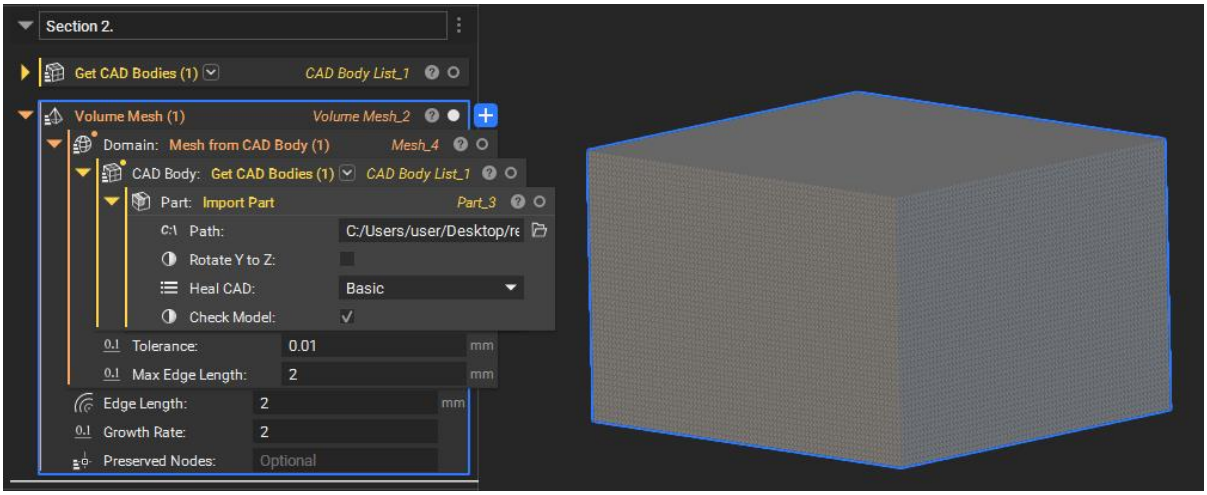
Η εισαγωγή πραγματοποιήθηκε μέσω της εντολής Get CAD Bodies και Import Part, επιλέγοντας το αντίστοιχο αρχείο γεωμετρίας (σχήμα 8.1.1).



Σχήμα 8.1.1 *Εισαγωγή δοκιμίου στο περιβάλλον του N-topology.*

2. Δημιουργία Πλέγματος (Volume Mesh)

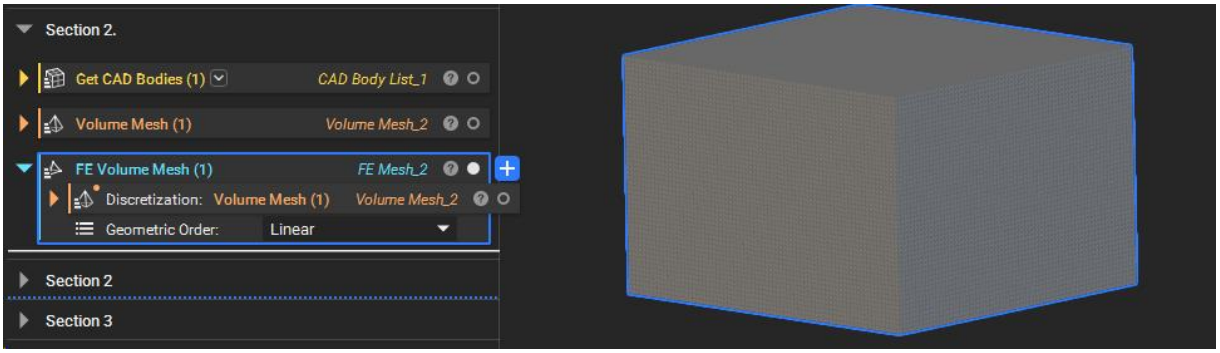
Μετά τη εισαγωγή της γεωμετρίας του δοκιμίου, πραγματοποιήθηκε η δημιουργία αριθμητικού πλέγματος όγκου (Volume Mesh), το οποίο αποτελεί προϋπόθεση για την εκτέλεση της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων. Η επιλογή των παραμέτρων πλέγματος πραγματοποιήθηκε με στόχο την επίτευξη ισορροπίας μεταξύ υπολογιστικής ακρίβειας και χρόνου επίλυσης. Δεδομένου ότι το μοντέλο είναι ομογενοποιημένο συνεχές σώμα χωρίς την περίπλοκη εσωτερική γεωμετρία της αυξητικής δομής δεν απαιτήθηκε ιδιαίτερα πυκνό πλέγμα (σχήμα 8.1.2).



Σχήμα 8.1.2 *Ρυθμίσεις και αποτελέσματα δημιουργίας Volume Mesh.*

3. Δημιουργία Fe Volume Mesh

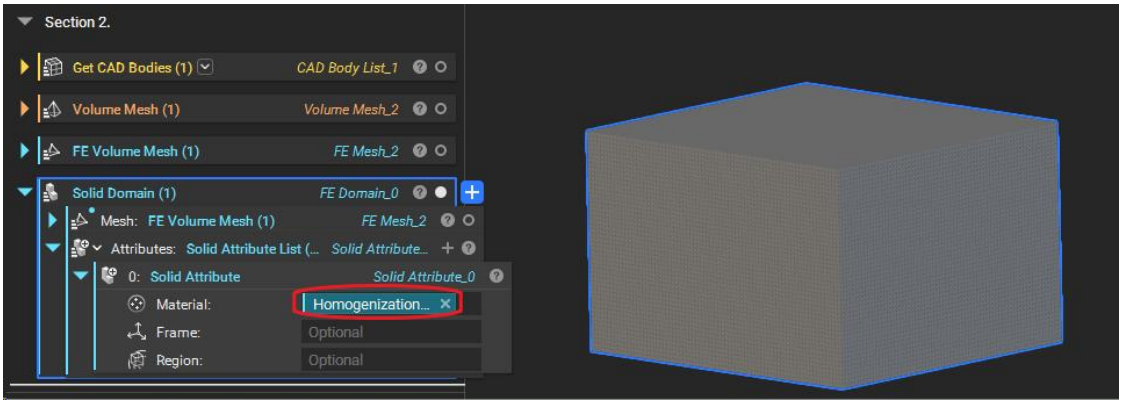
Μετά την δημιουργία του Volume Mesh, ακολούθησε ο ορισμός του πλέγματος ανάλυσης πεπειραμένων στοιχείων (Fe Volume Mesh) όπου αποτελεί την διακριτοποιημένη μορφή της γεωμετρίας που χρησιμοποιείται για την αριθμητική επίλυση της προσομοίωσης (σχήμα 8.1.3).



Σχήμα 8.1.3 *Ορισμός FE Volume Mesh με γραμμικά στοιχεία (Linear).*

4. Ορισμός Solid Domain και ανάθεση ομογενοποιημένου υλικού

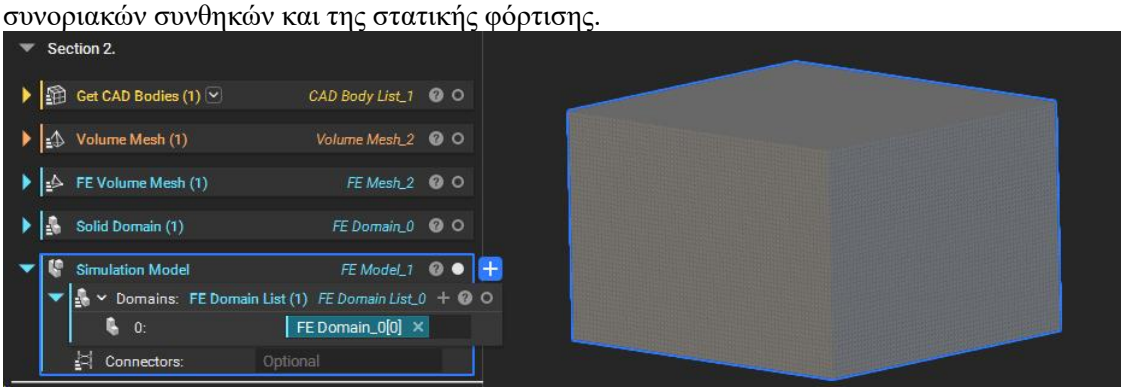
Το Solid Domain συνδέει το πλέγμα ανάλυσης (Fe volume mesh) με τις φυσικές ιδιότητες του υλικού, επιτρέποντας την περιγραφή του μηχανικού προβλήματος. Στο στάδιο αυτό πραγματοποιήθηκε η ανάθεση του ήδη υπολογισμένου ομογενοποιημένου υλικού (Homogenized Material) μέσω του ορισμού Solid Attribute (σχήμα 8.1.4). Με αυτή την ενέργεια το συμπαγές δοκίμιο αντιμετωπίζεται αριθμητικά ως ισοδύναμο συνεχές μέσο, του οποίου οι ελαστικές – μηχανικές ιδιότητες αντιστοιχούν σε εκείνες που προέκυψαν από την διαδικασία ομογενοποίησης της μοναδιαίας κυψέλης.



Σχήμα 8.1.4 *Ορισμός Solid Domain και ανάθεση ομογενοποιημένου υλικού στο FE μοντέλο.*

5. Δημιουργία Simulation Model

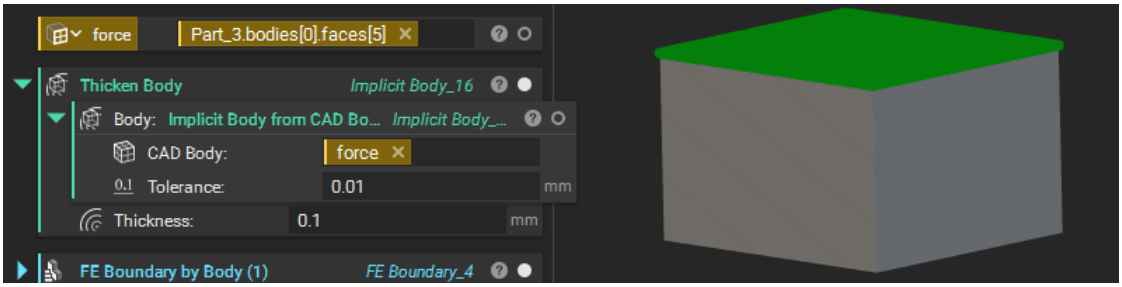
Μετά τον ορισμό του Solid Domain και την ανάθεση του ομογενοποιημένου υλικού, δημιουργήθηκε το Simulation Model (σχήμα 8.1.5), το οποίο αποτελεί το συνολικό υπολογιστικό πλαίσιο εντός του οποίου θα διαμορφώνεται και επιλύεται το πρόβλημα πεπερασμένων στοιχείων. Στο στάδιο αυτό ολοκληρώνεται η γεωμετρική και υλική περιγραφή του μοντέλου και προετοιμάζεται το περιβάλλον για τον ορισμό των συνοριακών συνθηκών και της στατικής φόρτισης.



Σχήμα 8.1.5 *Δημιουργία Simulation Model και εισαγωγή του FE Domain την ανάλυση.*

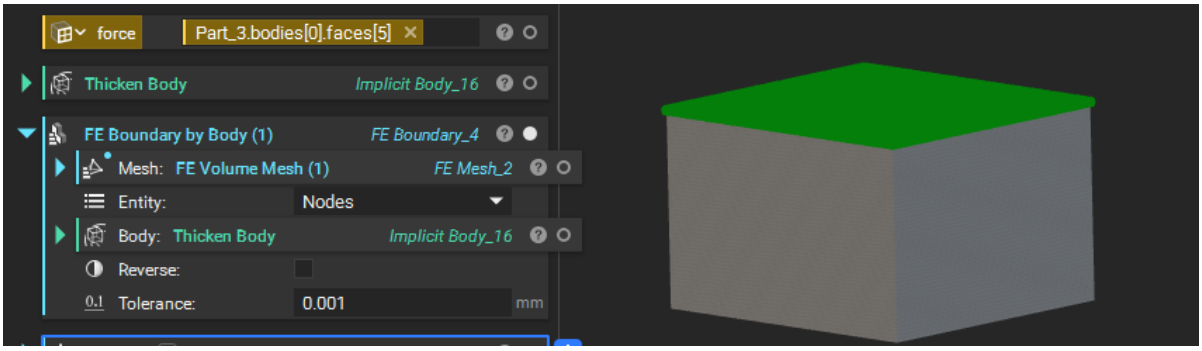
6. Ορισμός Συνοριακών Συνθηκών και Εφαρμογή Στατικής Φόρτισης

Στο επόμενο στάδιο πραγματοποιήθηκε ορισμός στατικής φόρτισης στο δοκίμιο. Αρχικά επιλέχθηκε η επιφάνεια του σώματος στην οποία πρόκειται να εφαρμοστεί η δύναμη (σχήμα 8.1.6).



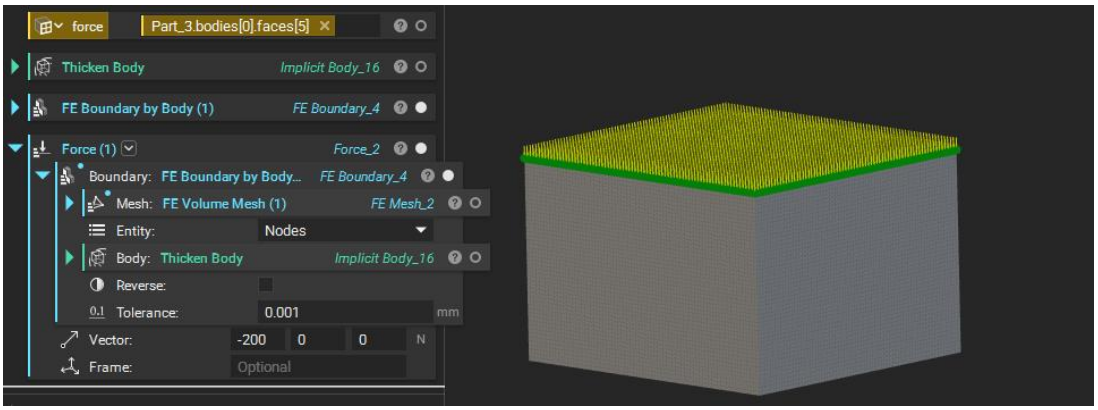
Σχήμα 8.1.6 *Επιλογή άνω επιφάνειας και δημιουργία FE Boundary για την εφαρμογή της δύναμης.*

Η επιλεγμένη επιφάνεια μετατράπηκε σε υπολογιστικό όριο μέσω της εντολής FE Boundary by Body (σχήμα 8.1.7), η οποία αντιστοιχίζει την γεωμετρία με τους αντίστοιχους κόμβους πλέγματος της ανάλυσης (FE Volume Mesh).

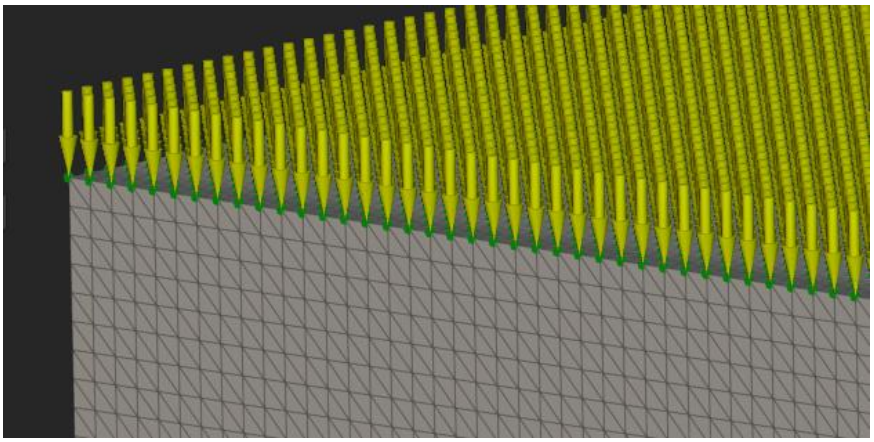


Σχήμα 8.1.7 *Αντιστοίχιση της επιλεγμένης επιφάνειας στους κόμβους το FE πλέγματος.*

Στην συνέχεια ορίστηκε η στατική δύναμη μέσω της εντολής Force, όπου καθορίστηκε το μέτρο φόρτισης στα 200 N καθώς και η κατεύθυνση της μέσω του διανυσματικού ορισμού (σχήμα 8.1.8 - 8.1.9)). Η επιλογή Nodes ως entity διασφαλίζει ότι εφαρμογή της πραγματοποιείται απευθείας στους κόμβους του FE πλέγματος, εξασφαλίζοντας αριθμητική συνέπεια κατά την επίλυση.



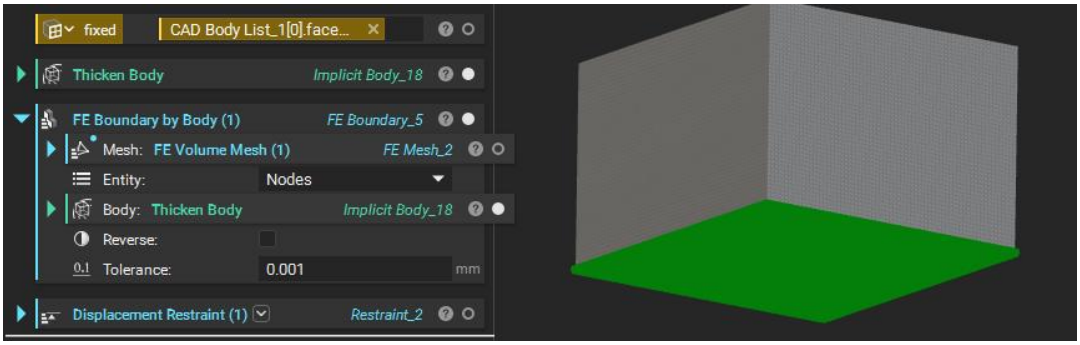
Σχήμα 8.1.8 *Ορισμός δύναμης και κατεύθυνσης φόρτισης στο FE Boundary (vector = -200 N).*



Σχήμα 8.1.9 *Οπτικοποίηση της εφαρμοζόμενης δύναμης στους κόμβους της άνω επιφάνειας του δοκιμίου.*

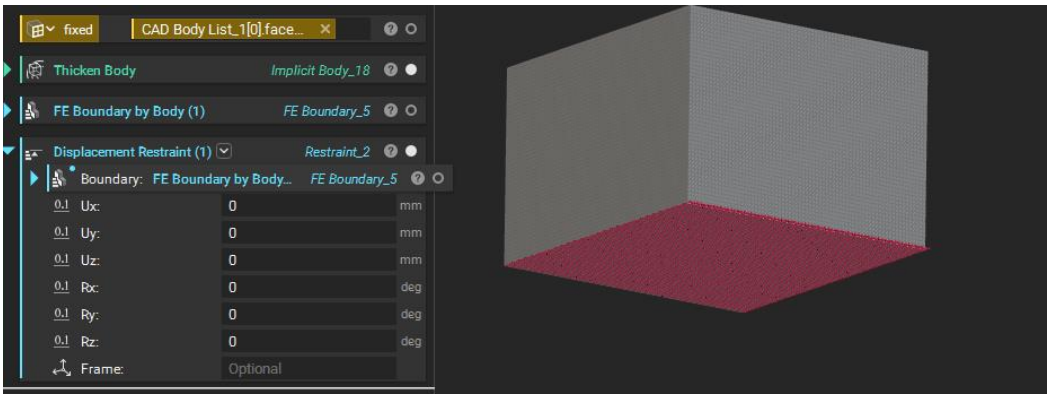
7. Ορισμός Συνοριακών Συνθηκών – Πάκτωση κάτω επιφάνειας

Μετά την εφαρμογή της εξωτερικής φόρτισης, ορίστηκαν οι συνοριακές συνθήκες στήριξης του δοκιμίου. Συγκεκριμένα επιλέχθηκε η κάτω επιφάνεια του σώματος και μετατράπηκε σε υπολογιστικό όριο μέσω της εντολής FE Boundary by body ώστε να γίνει αντιστοίχιση των κόμβων του πλέγματος που ανήκουν στην επιφάνεια αυτή (σχήμα 8.1.10).



Σχήμα 8.1.10 *Επιλογή της κάτω επιφάνειας του δοκιμίου για τον ορισμό συνοριακής συνθήκης.*

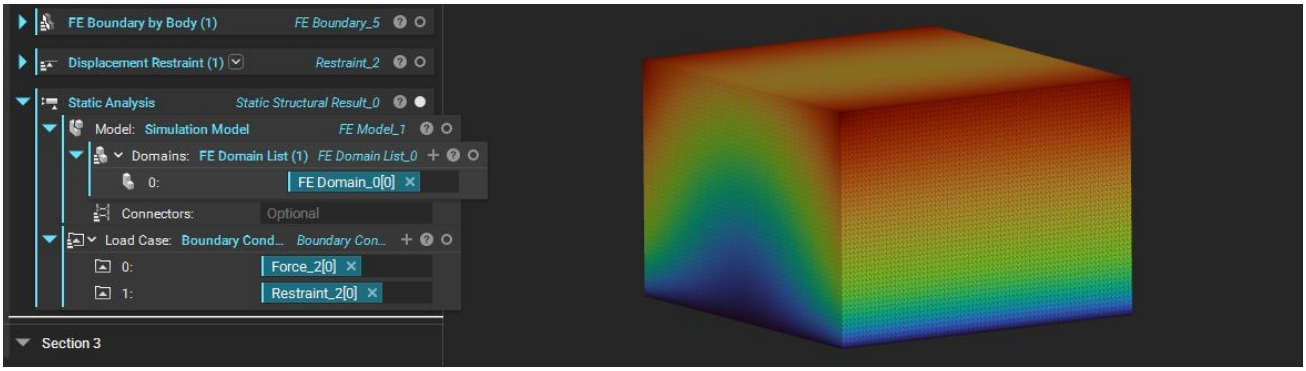
Στην συνέχεια εφαρμόστηκε η συνθήκη Displacement Restraint (σχήμα 8.1.11), με μηδενισμό όλων των βαθμών ελευθερίας ($U_x = U_y = U_Z = 0$ και $R_x = R_y = R_Z = 0$), προσομοιώνοντας πλήρη πάκτωση της κάτω επιφάνειας.



Σχήμα 8.1.11 *Ορισμός πάκτωσης (Fixed) στην επιφάνεια του δοκιμίου μέσω Displacement Restraint.*

8. Εκτέλεση Στατικής Ανάλυσης

Στο τελικό στάδιο πραγματοποιήθηκε η εκτέλεση της γραμμικής στατικής ανάλυσης. Στο περιβάλλον Static Analysis ενσωματώθηκαν στο Simulation Model, οι ορισμένες συνοριακές συνθήκες (πάκτωση κάτω επιφάνειας) και η εφαρμοζόμενη δύναμη στην άνω επιφάνεια (σχήμα 8.1.12).



Σχήμα 8.1.12 *Εκτέλεση στατικής ανάλυσης.*

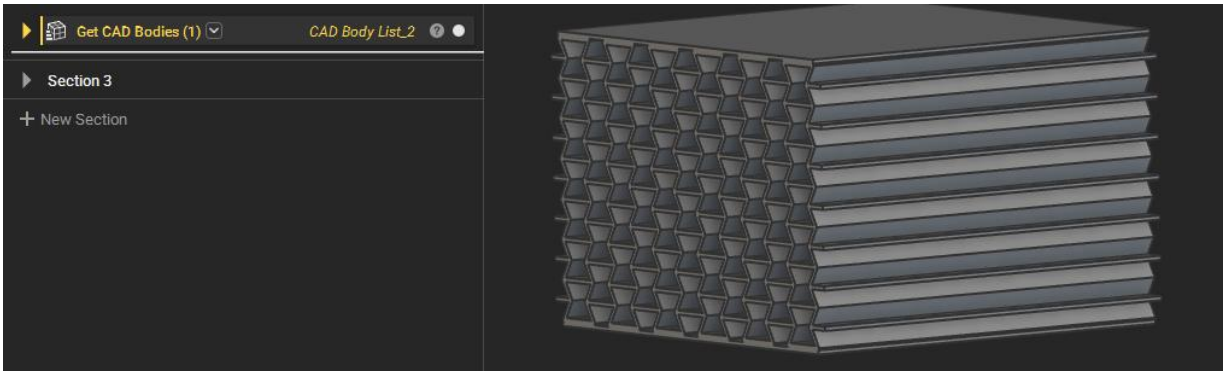
Με το στάδιο αυτό ολοκληρώνεται η διαδικασία ανάπτυξης και επίλυσης του ομογενοποιημένου μοντέλου. Με την επίλυση του συστήματος προέκυψε το επίπεδο μετατοπίσεων, με το βασικό μέγεθος ενδιαφέροντος να είναι η ολική μετατόπιση και ειδικότερα η μέγιστη τιμή της που χρησιμοποιείται ως ποσοτικός δείκτης της δυσκαμψίας του δοκιμίου, καθώς για δεδομένο φορτίο η μετατόπιση είναι αντιστρόφως ανάλογη της ισοδύναμης δυσκαμψίας.

8.2 Μεθοδολογία Μοντελοποίησης και ανάλυσης πλήρους γεωμετρίας

Η στατική προσομοίωση της πλήρους κυψελωτής γεωμετρίας των δοκιμίων αυξητικής δομής, είναι κατά βάση όμοια με εκείνη που εφαρμόστηκε για το ομογενοποιημένο μοντέλο. Ωστόσο, λόγω της πραγματικής μικροδομής, προέκυψαν ορισμένες διαφοροποιήσεις που αφορούν κυρίως τη διαδικασία πλεγματοποίησης (Meshing) και το υπολογιστικό κόστος της ανάλυσης.

1. Εισαγωγή πλήρης γεωμετρίας

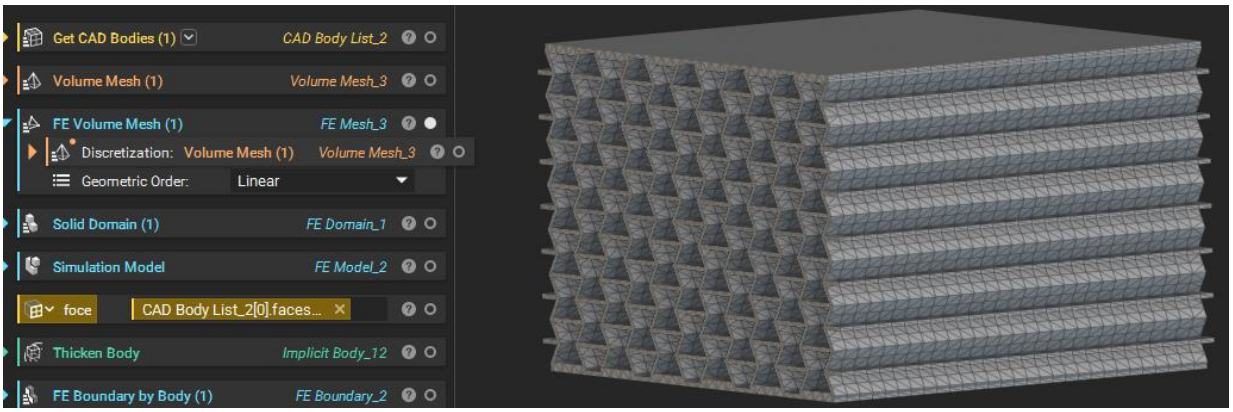
Αρχικά χρησιμοποιήθηκε η πλήρης γεωμετρική αναπαράσταση της αυξητικής δομής, όπως αυτή είχε παραχθεί στο πλαίσιο σχεδίασης των δοκιμίων (σχήμα 8.2.1).



Σχήμα 8.2.1 *Εισαγωγή δοκιμίου πλήρης γεωμετρικής ανάλυσης στο περιβάλλον του N-topology.*

2. Δημιουργία πλέγματος και FE Volume Mesh

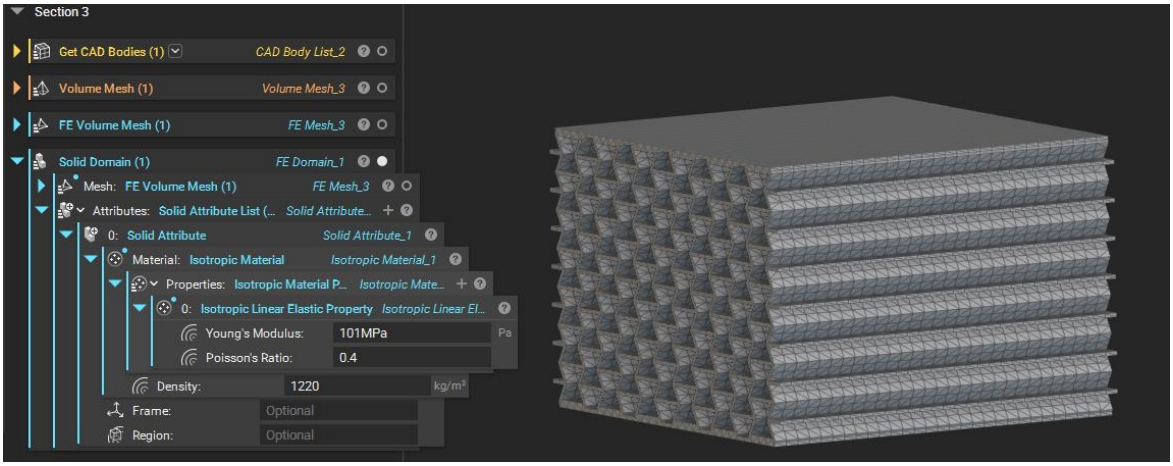
Στη συνέχεια δημιουργήθηκε Volume Mesh και FE Volume Mesh, ακολουθώντας αντίστοιχη διαδικασία με αυτή του ομογενοποιημένου μοντέλου. Ωστόσο λόγω της σύνθετης γεωμετρίας απαιτήθηκε σημαντικά πυκνότερο πλέγμα προκειμένου να αποτυπωθούν με ακρίβεια οι τοπικές συγκεντρώσεις τάσεων (σχήμα 8.2.2).



Σχήμα 8.2.2 *Δημιουργία Volume Mesh και ορισμός FE Volume Mesh στην πλήρη κυψελωτή γεωμετρία.*

3. Ορισμός υλικού

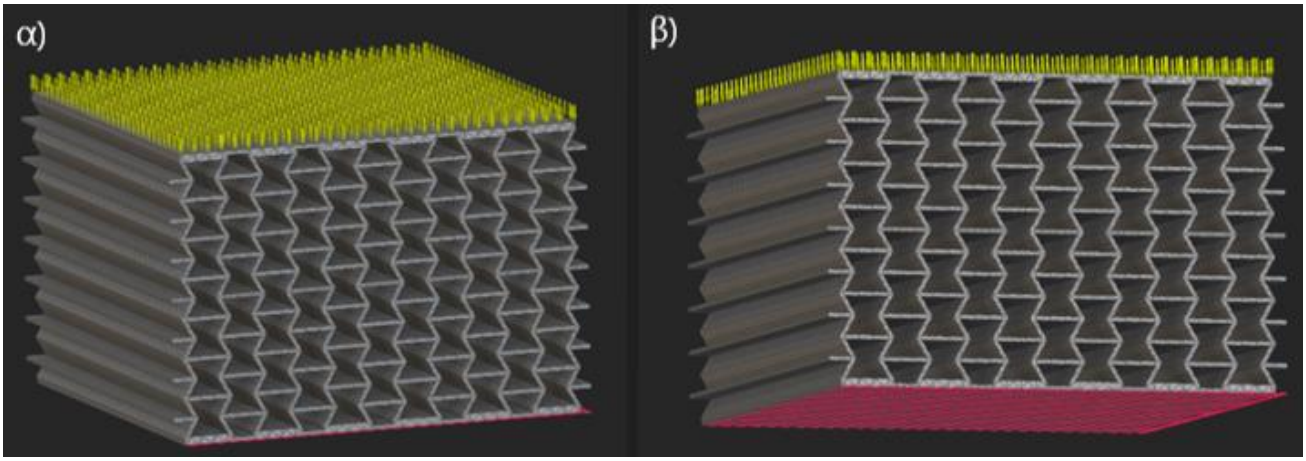
Ο ορισμός του υλικού πραγματοποιήθηκε στο FE Solid Domain με την ίδια διαδικασία αλλά με τις πραγματικές ιδιότητες του βασικού υλικού κατασκευής, σε αντίθεση με το ισοδύναμο ομογενοποιημένο υλικό που χρησιμοποιήθηκε στο προηγούμενο μοντέλο και στην συνέχεια δημιουργήθηκε το Simlation Model (σχήμα 8.2.3).



Σχήμα 8.2.3 *Ορισμός ισότροπου γραμμικά ελαστικού υλικού και ανάθεση στο FE Domain.*

4. Συνοριακές Συνθήκες και Φόρτιση

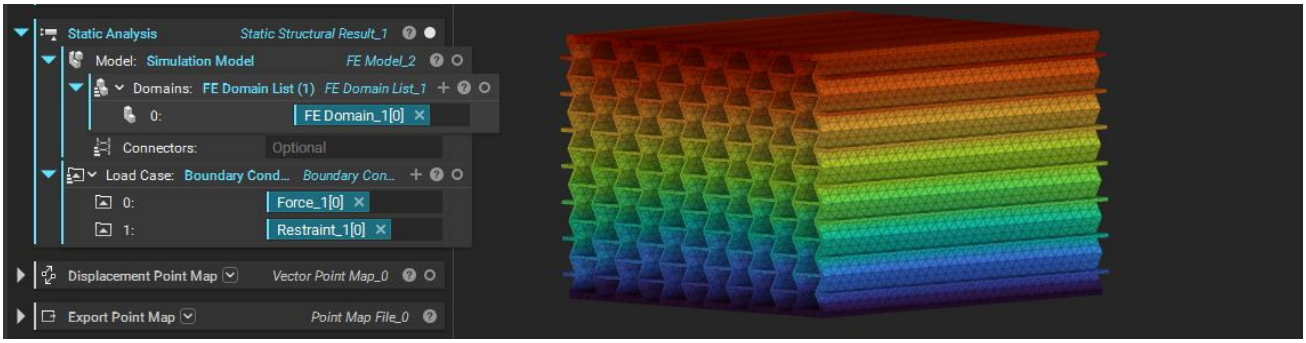
Οι συνοριακές συνθήκες και η εφαρμοζόμενη δύναμη ορίστηκαν με τον ίδιο ακριβώς τρόπο, με την κάτω επιφάνεια πλήρως πακτωμένη, ενώ στην άνω επιφάνεια εφαρμόστηκε η δύναμη (σχήμα 8.2.4).



Σχήμα 8.2.4 *Εφαρμογή συνοριακών συνθηκών (β) και στατικής φόρτισης (α).*

5. Εκτέλεση στατικής ανάλυσης – πλήρης κυψελωτής γεωμετρίας

Μετά τον ορισμό του Simulation Model, των συνοριακών συνθηκών και της εφαρμοζόμενης φόρτισης, πραγματοποιήθηκε η γραμμική στατική ανάλυση ενσωματώνοντας τις συνθήκες στο περιβάλλον του static analysis (σχήμα 8.2.5).



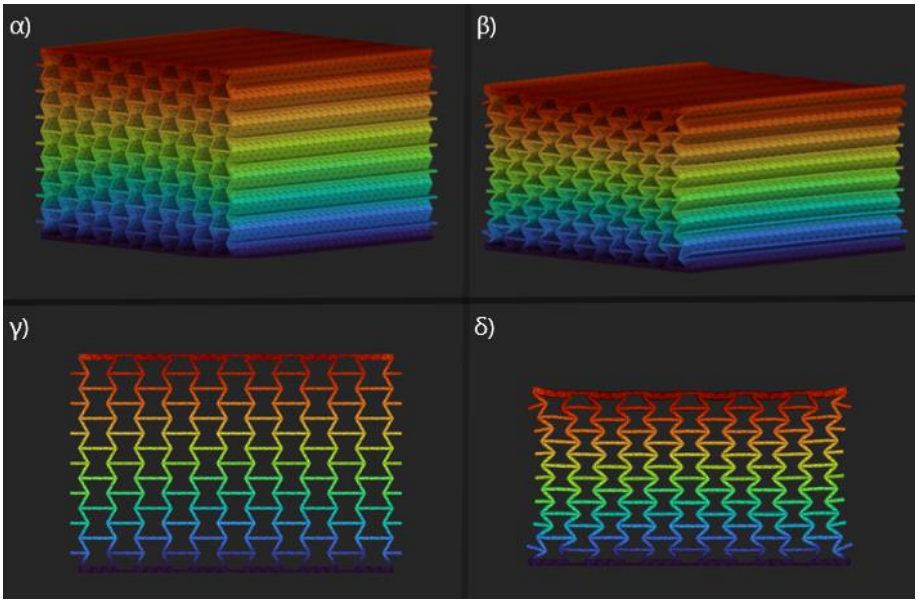
Σχήμα 8.2.5 *Εκτέλεση στατικής ανάλυσης.*

8.3 Συγκριτική Αξιολόγηση Ομογενοποιημένου Μοντέλου και Πλήρους Γεωμετρίας.

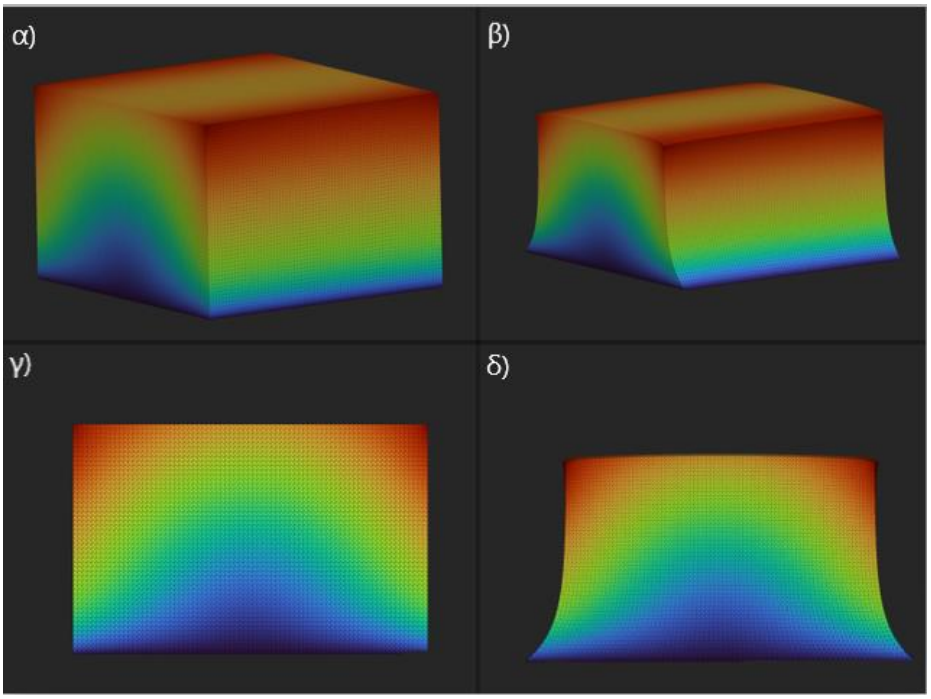
Ως βασικό συγκριτικό μέγεθος χρησιμοποιείται η μεταβολή του ύψους του δοκιμίου κατά τον άξονα φόρτισης, δηλαδή η μέση μετατόπιση της άνω επιφάνειας, δεδομένου ότι η κάτω επιφάνεια είναι πλήρως πακτωμένη. Με τον τρόπο αυτό αξιολογείται ο βαθμός προσέγγισης της ομογενοποίησης ως προς την πραγματική μηχανική συμπεριφορά της αυξητικής δομής.

8.3.1 Δομή Re-entrant

Πραγματοποιήθηκε στατική ανάλυση τόσο της πλήρους δομής όπως φαίνεται στο (σχήμα 8.3.1.1) , όσο και του αντίστοιχου ομογενοποιημένου μοντέλου (σχήμα 8.3.1.2) , υπό εφαρμογή φορτίου 200 N.



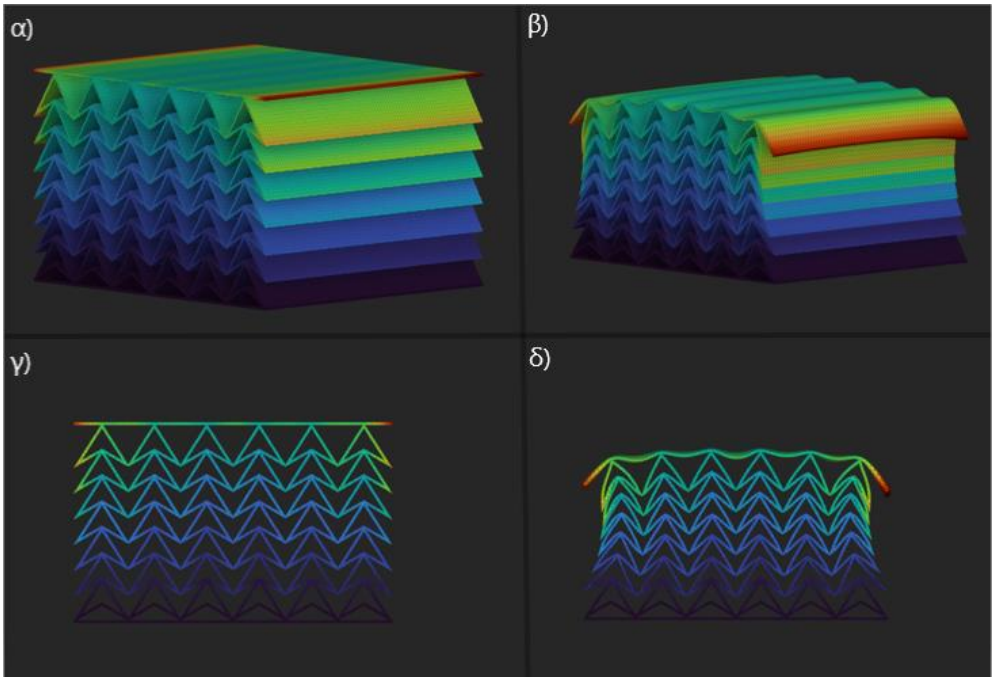
Σχήμα 8.3.1.1 *Απεικόνιση της δομής Re-entrant υπό στατική φόρτιση (α),(γ) Αρχική γεωμετρία, (β),(δ) Παραμορφωμένη μορφή*



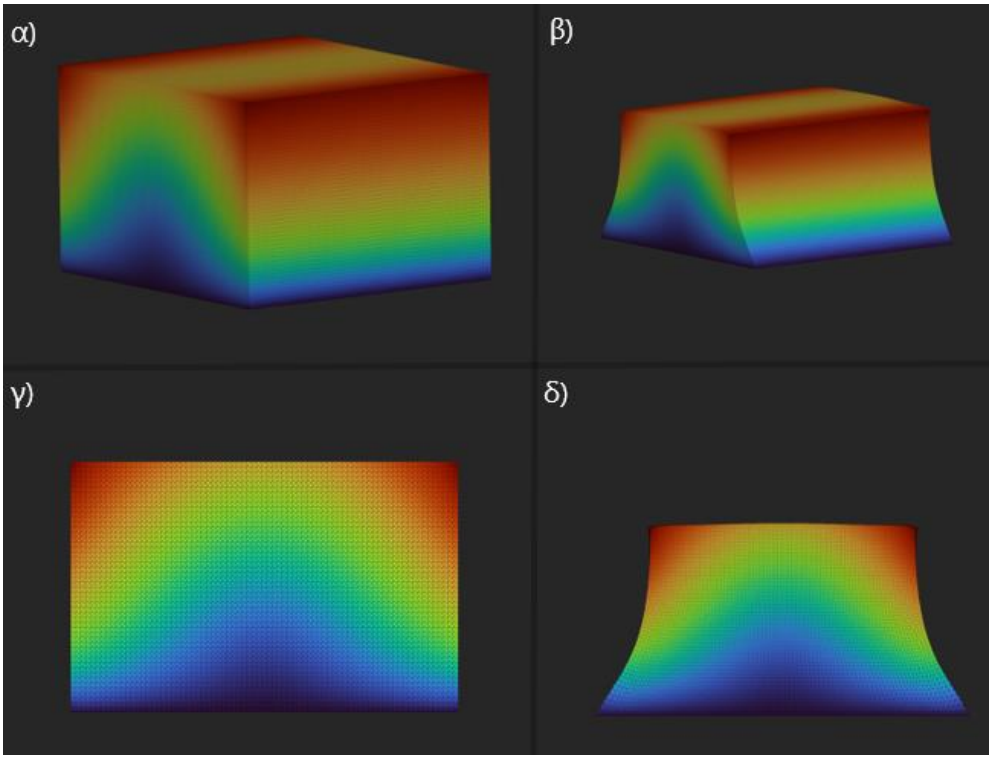
Σχήμα 8.3.1.2 *Απεικόνιση του ομογενοποιημένου μοντέλου της Re-entrant υπό στατική φόρτιση. (α),(γ) Αρχική γεωμετρία, (β),(δ) Παραμορφωμένη μορφή*

8.3.2 Δομή Arrowhead

Πραγματοποιήθηκε στατική ανάλυση τόσο της πλήρους δομής όπως φαίνεται στο (σχήμα 8.3.2.1) , όσο και του αντίστοιχου ομογενοποιημένου μοντέλου σχήμα (8.3.2.2) , υπό εφαρμογή φορτίου 200 N.



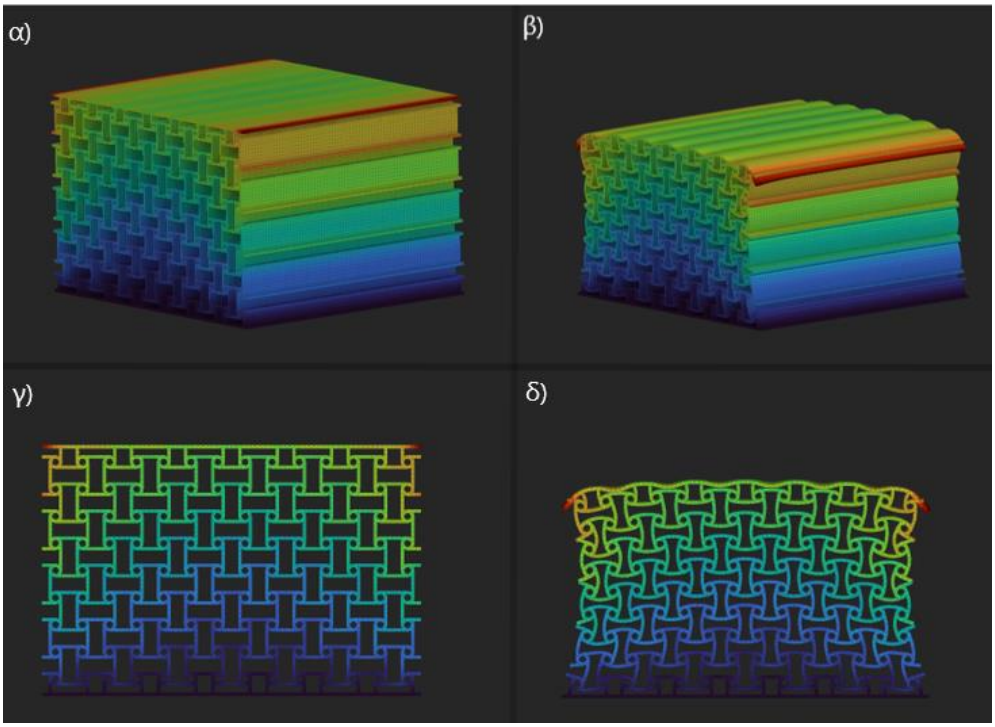
Σχήμα 8.3.2.1 *Απεικόνιση της δομή Arrowhead υπό στατική φόρτιση (α),(γ) Αρχική γεωμετρία, (β),(δ) Παραμορφωμένη μορφή*



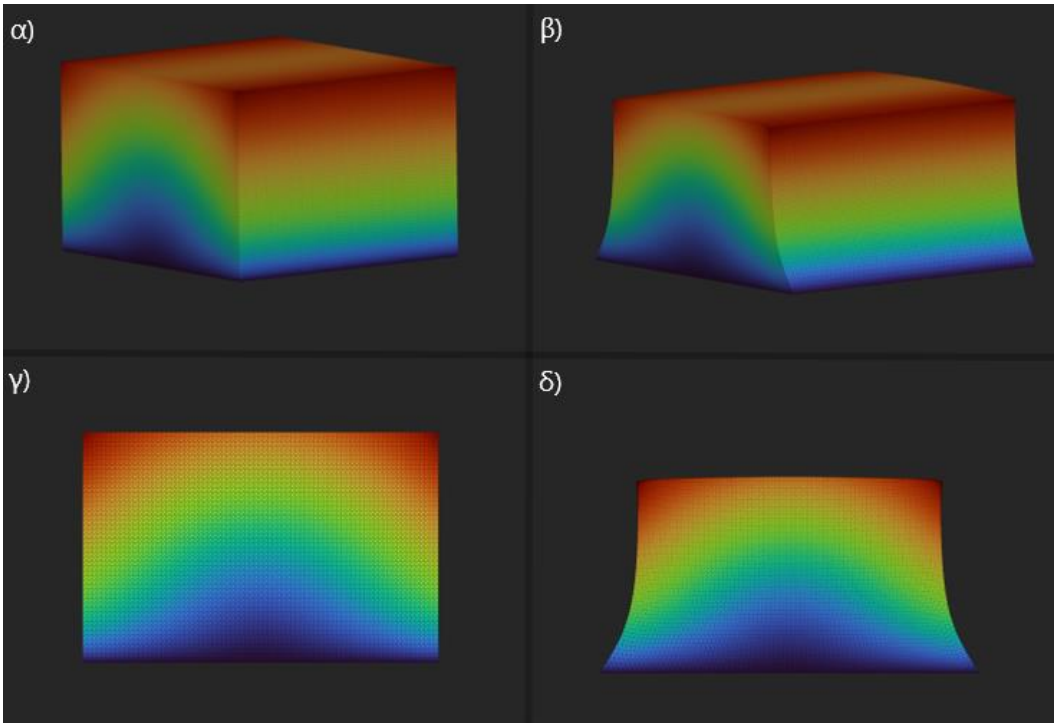
Σχήμα 8.3.2.2 *Απεικόνιση του ομογενοποιημένου μοντέλου της Arrowhead υπό στατική φόρτιση. (α),(γ) Αρχική γεωμετρία, (β),(δ) Παραμορφωμένη μορφή.*

8.3.3 Δομή Anti-tetra chiral

Πραγματοποιήθηκε στατική ανάλυση τόσο της πλήρους δομής όπως φαίνεται στο (σχήμα 8.3.3.1) , όσο και του αντίστοιχου ομογενοποιημένου μοντέλου (σχήμα 8.3.3.2), υπό εφαρμογή φορτίου 200 N.



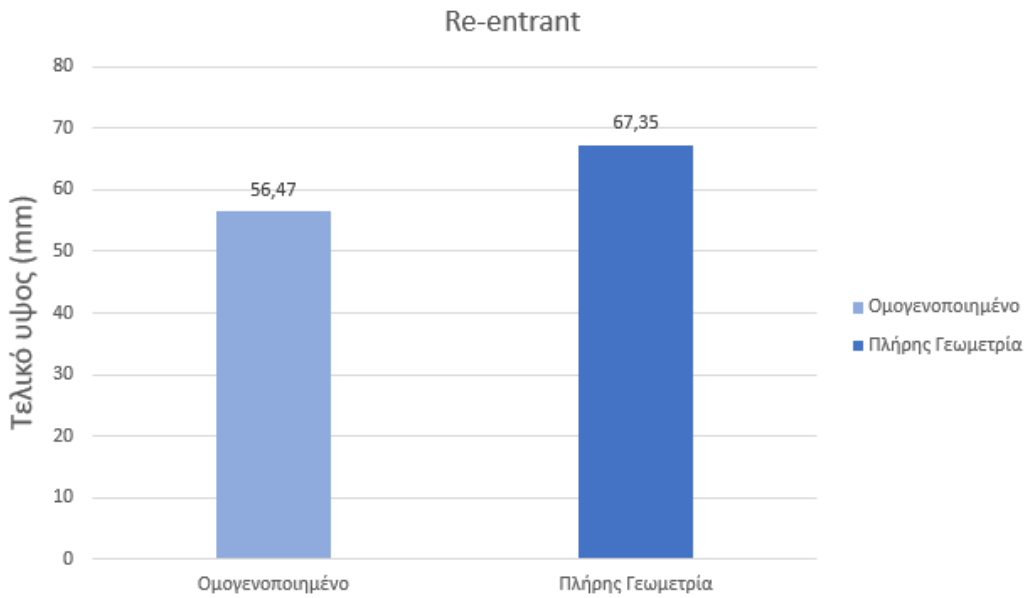
Σχήμα 8.3.3.1 *Απεικόνιση της δομή Anti-tetra chiral υπό στατική φόρτιση (α),(γ) Αρχική γεωμετρία, (β),(δ) Παραμορφωμένη μορφή*



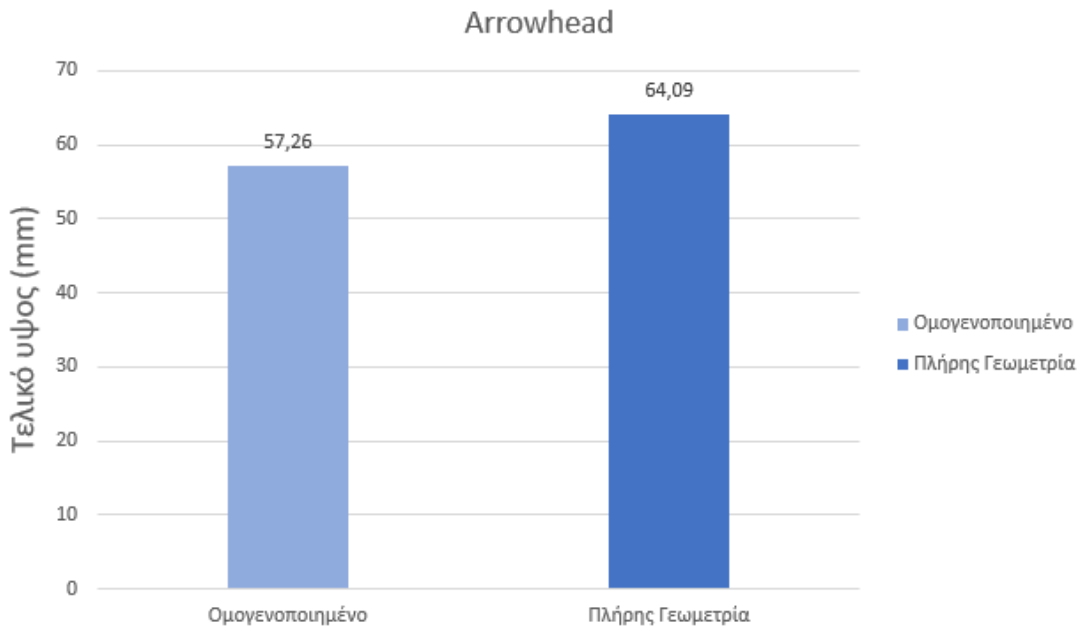
Σχήμα 8.3.3.2 *Απεικόνιση του ομογενοποιημένου μοντέλου της Anti-tetra chiral υπό στατική φόρτιση. (α),(γ) Αρχική γεωμετρία, (β),(δ) Παραμορφωμένη μορφή*

8.3.4 Σύγκριση Αποτελεσμάτων

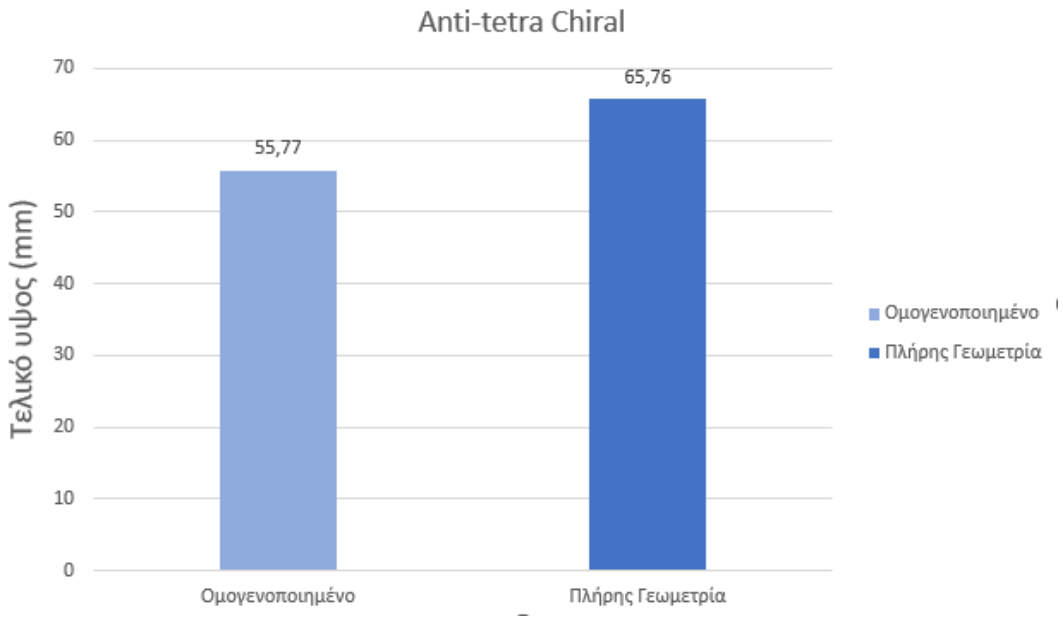
Τα αποτελέσματα της στατικής προσομοίωσης παρουσιάζονται παρακάτω στον (πίνακα 8.3.4.1) και στα αντίστοιχα διαγράμματα κάθε δομής:



Σχήμα 8.3.4.1 *Σύγκριση του τελικού ύψους της δομής Re-entrant μεταξύ ομογενοποιημένου και πλήρης γεωμετρίας.*



Σχήμα 8.3.4.2 *Σύγκριση του τελικού ύψους της δομής Arrowhead μεταξύ ομογενοποιημένου και πλήρης γεωμετρίας.*



Σχήμα 8.3.4.3 *Σύγκριση του τελικού ύψους της δομής Anti-tetra Chiral μεταξύ ομογενοποιημένου και πλήρης γεωμετρίας.*

Δομή	ΔΗ Πλήρους γεωμετρίας (mm)	ΔΗ Ομογενοποιημένου (mm)	Απόκλιση (%)
Re-entrant	3.65	13.53	15.64
Arrowhead	5.91	12.74	9.76
Anti-tetra Chiral	4.24	14.23	14.27

Πίνακας 8.3.4.1 *Σύγκριση αξονικής μετατόπισης και ποσοστιαίας απόκλισης μεταξύ πλήρους γεωμετρίας και ομογενοποιημένου μοντέλου.*

Από τη συγκριτική αξιολόγηση των τριών αυξητικών δομών προκύπτει ότι το ομογενοποιημένο μοντέλο παρουσιάζει συστηματική απόκλιση σε σχέση με την πλήρη γεωμετρία, με μέση ποσοστιαία διαφορά ίση με 13.22%. η μικρότερη απόκλιση παρατηρείται στη δομή Arrowhead, ενώ οι δομές Re-entrant και Anti-tetra Chiral εμφανίζουν ελαφρώς μεγαλύτερη διαφοροποίηση.

Παρά τις αποκλίσεις που παρατηρήθηκαν, τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι η ομογενοποιημένη προσέγγιση παρέχει ικανοποιητική πρώτη εκτίμηση της μακροσκοπικής μηχανικής συμπεριφοράς των δοκιμίων. Δεδομένου ότι το υπολογιστικό κόστος της πλήρους γεωμετρικής ανάλυσης είναι σημαντικά υψηλότερο, η χρήση του ομογενοποιημένου μοντέλου κρίνεται κατάλληλη σε αρχικά στάδια σχεδιασμού ή σε παραμετρικές μελέτες μεγάλης κλίμακας.

Συνεπώς, η ομογενοποίηση δεν αντικαθιστά την πλήρη γεωμετρική προσομοίωση σε εφαρμογές υψηλής ακρίβειας, αλλά αποτελεί αποτελεσματικό και πρακτικό εργαλείο μηχανικής προσέγγισης, ιδιαίτερα όταν προτεραιότητα αποτελεί η μείωση του υπολογιστικού χρόνου.

Βιβλιογραφία/Αναφορές

[1] ‘SLA-1 in the National Inventors Hall of Fame Museum | 3D Systems’. Ημερομηνία πρόσβασης: 9 Απρίλιος 2025. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://www.3dsystems.com/blog/2015/06/sla-1-national-inventors-hall-fame-museum

[2] ‘Τρισδιάστατη εκτύπωση’, *Βικιπαίδεια*. 16 Μάρτιος 2025. Ημερομηνία πρόσβασης: 8 Απρίλιος 2025. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://el.wikipedia.org/w/index.php?title=%CE%A4%CF%81%CE%B9%CF%83%CE%B4%CE%B9%CE%AC%CF%83%CF%84%CE%B1%CF%84%CE%B7_%CE%B5%CE%BA%CF%84%CF%8D%CF%80%CF%89%CF%83%CE%B7&oldid=11015187

[3] ‘The History Of Additive Manufacturing: From The 80s to Today’. Ημερομηνία πρόσβασης: 8 Απρίλιος 2025. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://prototaluk.com/blog/history-of-additive-manufacturing/

[4] ‘What is additive manufacturing? History and benefits’, Triditive. Ημερομηνία πρόσβασης: 8 Απρίλιος 2025. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://triditive.com/what-is-additive-manufacturing-history-and-benefits/

[5] ‘Additive Manufacturing History: From the 1980’s to Now’. Ημερομηνία πρόσβασης: 8 Απρίλιος 2025. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://markforged.com/resources/blog/additive-manufacturing-history

[6] I. Gibson, D. Rosen, και B. Stucker, ‘Introduction and Basic Principles’, στο *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*, I. Gibson, D. Rosen, και B. Stucker, Επιμ., New York, NY: Springer, 2015, σελ. 1–18. doi: 10.1007/978-1-4939-2113-3_1.

[7] H. Peng *κ.ά.*, ‘3D printing processes in precise drug delivery for personalized medicine’, *Biofabrication*, τ. 16, τχ. 3, σελ. 032001, Ιουλίου 2024, doi: 10.1088/1758-5090/ad3a14.

[8] ‘What Are Supports in 3D Printing?’, https://sg.cytron.io/tutorial. Ημερομηνία πρόσβασης: 9 Απρίλιος 2025. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://sg.cytron.io/tutorial/what-are-supports-in-3d-printing

[9] S. Technologies, ‘Additive Support Structures: Why They Matter and How to Design for Them’, SyBridge Technologies. Ημερομηνία πρόσβασης: 8 Απρίλιος 2025. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://sybridge.com/support-structures-why-they-matter-and-how-to-design-for-them/

[10] ‘3D Print Post Processing - Ultimate Guide - 16 Ways’. Ημερομηνία πρόσβασης: 9 Απρίλιος 2025. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://bigrep.com/post-processing/

[11] ‘The Top Challenges in Additive Manufacturing and How to Overcome Them’, Dassault Systèmes. Ημερομηνία πρόσβασης: 8 Απρίλιος 2025. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://www.3ds.com/make/solutions/blog/top-challenges-additive-manufacturing-and-how-overcome-them

[12] ‘3D printing processes’, *Wikipedia*. 7 Απρίλιος 2025. Ημερομηνία πρόσβασης: 9 Απρίλιος 2025. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=3D_printing_processes&oldid=1284439424

[13] ‘The 7 categories of Additive Manufacturing | Additive Manufacturing Research Group | Loughborough University’. Ημερομηνία πρόσβασης: 8 Απρίλιος 2025. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/

[14] A. Jandyal, I. Chaturvedi, I. Wazir, A. Raina, και M. I. Ul Haq, ‘3D printing – A review of processes, materials and applications in industry 4.0’, *Sustain. Oper. Comput.*, τ. 3, σελ. 33–42, Ιανουαρίου 2022, doi: 10.1016/j.susoc.2021.09.004.

[15] A. Bhatia και A. K. Sehgal, ‘Additive manufacturing materials, methods and applications: A review’, *Mater. Today Proc.*, τ. 81, σελ. 1060–1067, Ιανουαρίου 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2021.04.379.

[16] ‘Additive Manufacturing Materials’, What Is Additive Manufacturing? Ημερομηνία πρόσβασης: 9 Απρίλιος 2025. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://www.additivemanufacturing.media/kc/what-is-additive-manufacturing/am-materials

[17] ‘Material Extrusion | Additive Manufacturing Research Group | Loughborough University’. Ημερομηνία πρόσβασης: 9 Απρίλιος 2025. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/materialextrusion/

[18] I. Gibson, D. Rosen, και B. Stucker, ‘Extrusion-Based Systems’, στο *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*, I. Gibson, D. Rosen, και B. Stucker, Επιμ., New York, NY: Springer, 2015, σελ. 147–173. doi: 10.1007/978-1-4939-2113-3_6.

[19] D. Chekkaramkodi, L. Jacob, M. S. C, R. Umer, και H. Butt, ‘Review of vat photopolymerization 3D printing of photonic devices’, *Addit. Manuf.*, τ. 86, σελ. 104189, Απριλίου 2024, doi: 10.1016/j.addma.2024.104189.

[20] unionfab, ‘SLA 3D Printing for Automotive - From Prototyping to Modification’, Unionfab. Ημερομηνία πρόσβασης: 9 Απρίλιος 2025. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://www.unionfab.com/blog/2023/08/sla-3d-printing-for-automotive

[21] ‘SLA 3D Printing Materials Compared’, Dassault Systèmes. Ημερομηνία πρόσβασης: 9 Απρίλιος 2025. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://www.3ds.com/make/solutions/blog/sla-3d-printing-materials-compared

[22] T. Jiang *κ.ά.*, ‘Enhanced Adhesion—Efficient Demolding Integration DLP 3D Printing Device’, *Appl. Sci.*, τ. 12, τχ. 15, Art. τχ. 15, Ιανουαρίου 2022, doi: 10.3390/app12157373.

[23] S. Laurenson, ‘DLP 3D Printing: Understanding process and materials enables you to prevent production problems’. Ημερομηνία πρόσβασης: 9 Απρίλιος 2025. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://www.wevolver.com/article/dlp.3d.printing.understanding.process.and.materials.enables.you.to.prevent.production.problems

[24] ‘Material Jetting’, Dassault Systèmes. Ημερομηνία πρόσβασης: 9 Απρίλιος 2025. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://www.3ds.com/make/guide/process/material-jetting

[25] A. Elkaseer, K. J. Chen, J. C. Janhsen, O. Refle, V. Hagenmeyer, και S. G. Scholz, ‘Material jetting for advanced applications: A state-of-the-art review, gaps and future directions’, *Addit. Manuf.*, τ. 60, σελ. 103270, Δεκεμβρίου 2022, doi: 10.1016/j.addma.2022.103270.

[26] I. Gibson, D. Rosen, και B. Stucker, ‘Material Jetting’, στο *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*, I. Gibson, D. Rosen, και B. Stucker, Επιμ., New York, NY: Springer, 2015, σελ. 175–203. doi: 10.1007/978-1-4939-2113-3_7.

[27] AZOTH3D, ‘What Really Is Metal Material Jetting? - AZOTH3D’. Ημερομηνία πρόσβασης: 9 Απρίλιος 2025. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://www.azoth3d.com/what-really-is-metal-material-jetting/

[28] I. Gibson, D. Rosen, και B. Stucker, ‘Binder Jetting’, στο *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*, I. Gibson, D. Rosen, και B. Stucker, Επιμ., New York, NY: Springer, 2015, σελ. 205–218. doi: 10.1007/978-1-4939-2113-3_8.

[29] A. Mostafaei *κ.ά.*, ‘Binder jet 3D printing—Process parameters, materials, properties, modeling, and challenges’, *Prog. Mater. Sci.*, τ. 119, σελ. 100707, Ιουνίου 2021, doi: 10.1016/j.pmatsci.2020.100707.

[30] ‘Binder Jetting’, Dassault Systèmes. Ημερομηνία πρόσβασης: 9 Απρίλιος 2025. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://www.3ds.com/make/guide/process/binder-jetting

[31] ‘Προσθετική κατασκευή με εκτόξευση συνδετικού υλικού - Προμηθευτής μεταλλικής σκόνης 3D εκτύπωσης’. Ημερομηνία πρόσβασης: 9 Απρίλιος 2025. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://3dpmetal.com/el/binder-jetting-additive-manufacturing-202408132/

[32] ‘ExOne Sand Materials & Binders: Versatility to Support Casting Processes’. Ημερομηνία πρόσβασης: 9 Απρίλιος 2025. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://www.exone.com/en-US/3d-printing-materials-and-binders/sand

[33] S. Negi, S. Dhiman, και R. K. Sharma, ‘BASICS, APPLICATIONS AND FUTURE OF ADDITIVE MANUFACTURING TECHNOLOGIES: A REVIEW’.

[34] I. Gibson, D. Rosen, και B. Stucker, ‘Powder Bed Fusion Processes’, στο *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*, I. Gibson, D. Rosen, και B. Stucker, Επιμ., New York, NY: Springer, 2015, σελ. 107–145. doi: 10.1007/978-1-4939-2113-3_5.

[35] ‘Guide to Selective Laser Sintering (SLS) 3D Printing’, Formlabs. Ημερομηνία πρόσβασης: 9 Απρίλιος 2025. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://formlabs.com/eu/blog/what-is-selective-laser-sintering/?srsltid=AfmBOopP6b9xU3rW4foZVVdM0PFgtsIN4MZS7eUGQoOZFky-Mm47I1Bd

[36] M. Hogan, ‘Types & Benefits of SLS Materials for 3D Printing’, Nexa3D. Ημερομηνία πρόσβασης: 9

Απρίλιος 2025. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://nexa3d.com/blog/sls-materials/

[37] I. Gibson, D. Rosen, και B. Stucker, 'Directed Energy Deposition Processes', στο *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*, I. Gibson, D. Rosen, και B. Stucker, Επιμ., New York, NY: Springer, 2015, σελ. 245–268. doi: 10.1007/978-1-4939-2113-3_10.

[38] A. Selema, M. N. Ibrahim, και P. Sergeant, 'Metal Additive Manufacturing for Electrical Machines: Technology Review and Latest Advancements', *Energies*, τ. 15, τχ. 3, σελ. 1076, Ιανουαρίου 2022, doi: 10.3390/en15031076.

[39] I. Gibson, D. Rosen, και B. Stucker, 'Sheet Lamination Processes', στο *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*, I. Gibson, D. Rosen, και B. Stucker, Επιμ., New York, NY: Springer, 2015, σελ. 219–244. doi: 10.1007/978-1-4939-2113-3_9.

[40] 'What is Sheet Lamination?', Engineering Product Design. Ημερομηνία πρόσβασης: 9 Απρίλιος 2025. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://engineeringproductdesign.com/knowledge-base/sheet-lamination/

[41] 'Auxetics', *Wikipedia*. 13 Μάρτιος 2025. Ημερομηνία πρόσβασης: 9 Απρίλιος 2025. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Auxetics&oldid=1280328192

[42] 'Response: Negative Poisson's Ratio Materials'. Ημερομηνία πρόσβασης: 6 Απρίλιος 2025. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://www.science.org/doi/10.1126/science.238.4826.551.b

[43] X. Yan, R. Wang, Y. Chen, Y. Cheng, και X. Liang, 'Energy absorption characteristics of honeycomb materials with negative poisson's ratio*', *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, τ. 1040, τχ. 1, σελ. 012002, Ιανουαρίου 2021, doi: 10.1088/1757-899X/1040/1/012002.

[44] 'Zhou_Ziao.pdf'. Ημερομηνία πρόσβασης: 6 Απρίλιος 2025. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/166098/Zhou_Ziao?sequence=3

[45] S. Thread, 'What is Young's Modulus?' Ημερομηνία πρόσβασης: 9 Απρίλιος 2025. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://www.servicethread.com/blog/what-is-youngs-modulus

[46] 'Young's modulus', *Wikipedia*. 29 Μάρτιος 2025. Ημερομηνία πρόσβασης: 6 Απρίλιος 2025.

[Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Young%27s_modulus&oldid=1282966396

[47] A. Joseph, V. Mahesh, και D. Harursampath, 'On the application of additive manufacturing methods for auxetic structures: a review', *Adv. Manuf.*, τ. 9, τχ. 3, σελ. 342–368, Σεπτεμβρίου 2021, doi: 10.1007/s40436-021-00357-y.

[48] N. Grimmelsmann, H. Meissner, και A. Ehrmann, '3D printed auxetic forms on knitted fabrics for adjustable permeability and mechanical properties', *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, τ. 137, τχ. 1, σελ. 012011, Απριλίου 2016, doi: 10.1088/1757-899X/137/1/012011.

[49] C. Quan, B. Han, Z. Hou, Q. Zhang, X. Tian, και T. J. Lu, '3d printed continuous fiber reinforced composite auxetic honeycomb structures', *Compos. Part B Eng.*, τ. 187, σελ. 107858, Απριλίου 2020, doi: 10.1016/j.compositesb.2020.107858.

[50] S. Vyavahare και S. Kumar, 'Numerical and experimental investigation of FDM fabricated re-entrant auxetic structures of ABS and PLA materials under compressive loading', *Rapid Prototyp. J.*, τ. 27, τχ. 2, σελ. 223–244, Ιανουαρίου 2021, doi: 10.1108/RPJ-10-2019-0271.

[51] V. A. Lvov, F. S. Senatov, A. M. Korsunsky, και A. I. Salimon, 'Design and mechanical properties of 3D-printed auxetic honeycomb structure', *Mater. Today Commun.*, τ. 24, σελ. 101173, Σεπτεμβρίου 2020, doi: 10.1016/j.mtcomm.2020.101173.

[52] S. Gohar, G. Hussain, M. Ilyas, και A. Ali, 'Performance of 3D printed topologically optimized novel auxetic structures under compressive loading: experimental and FE analyses', *J. Mater. Res. Technol.*, τ. 15, σελ. 394–408, Νοεμβρίου 2021, doi: 10.1016/j.jmrt.2021.07.149.

[53] D. Mocerino, M. R. Ricciardi, V. Antonucci, και I. Papa, 'Fused Deposition Modelling of Polymeric Auxetic Structures: A Review', *Polymers*, τ. 15, τχ. 4, Art. τχ. 4, Ιανουαρίου 2023, doi: 10.3390/polym15041008.

[54] M. Sanami, N. Ravirala, K. Alderson, και A. Alderson, 'Auxetic Materials for Sports Applications', *Procedia Eng.*, τ. 72, σελ. 453–458, Ιανουαρίου 2014, doi: 10.1016/j.proeng.2014.06.079.

[55] M. Mir, M. N. Ali, J. Sami, και U. Ansari, 'Review of Mechanics and Applications of Auxetic Structures', *Adv. Mater. Sci. Eng.*, τ. 2014, τχ. 1, σελ. 753496, 2014, doi: 10.1155/2014/753496.

[56] M. Najafi, H. Ahmadi, και G. Liaghat, 'Experimental investigation on energy absorption of auxetic

structures', *Mater. Today Proc.*, τ. 34, σελ. 350–355, Ιανουαρίου 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2020.06.075.

[57] A. Ingrole, A. Hao, και R. Liang, 'Design and modeling of auxetic and hybrid honeycomb structures for in-plane property enhancement', *Mater. Des.*, τ. 117, σελ. 72–83, Μαρτίου 2017, doi: 10.1016/j.matdes.2016.12.067.

[58] M. H. Zamani, M. Heidari-Rarani, και M. Mirkhalf, 'Design, optimization and additive manufacturing of an innovative bike helmet using auxetic metastructures', *Int. J. Solids Struct.*, τ. 310, σελ. 113240, Μαρτίου 2025, doi: 10.1016/j.ijsolstr.2025.113240.

[59] L. Meeusen, S. Candidori, L. L. Micoli, G. Guidi, T. Stanković, και S. Graziosi, 'Auxetic structures used in kinesiology tapes can improve form-fitting and personalization', *Sci. Rep.*, τ. 12, τχ. 1, σελ. 13509, Αυγούστου 2022, doi: 10.1038/s41598-022-17688-w.

[60] W. Hou, P. He, Y. Yang, και L. Sang, 'Crashworthiness optimization of crash box with 3D-printed lattice structures', *Int. J. Mech. Sci.*, τ. 247, σελ. 108198, Ιουνίου 2023, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2023.108198.

[61] C. Wang, W. Wang, W. Zhao, Y. Wang, και G. Zhou, 'Structure design and multi-objective optimization of a novel NPR bumper system', *Compos. Part B Eng.*, τ. 153, σελ. 78–96, Νοεμβρίου 2018, doi: 10.1016/j.compositesb.2018.07.024.

[62] 'Ece R42 | PDF | Vehicles | Suspension (Vehicle)', Scribd. Ημερομηνία πρόσβασης: 6 Απρίλιος 2025. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://www.scribd.com/document/291206528/ECE-R42

[63] 'RCAR 15 km-h test procedure Version 2_4.pdf'. Ημερομηνία πρόσβασης: 6 Απρίλιος 2025. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://www.azt-automotive.com/_Resources/Persistent/cc71045e21b31eaad9e08cd62ddb33e95e77a758/RCAR%2015%20km-h%20test%20procedure%20Version%202_4.pdf

[64] 'euro-ncap-protocol-crash-protection-frontal-impact-v10.pdf'. Ημερομηνία πρόσβασης: 6 Απρίλιος 2025. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://www.euroncap.com/media/85826/euro-ncap-protocol-crash-protection-frontal-impact-v10.pdf

[65] C. Wang, W. Wang, W. Zhao, Y. Wang, και G. Zhou, 'Structure design and multi-objective

optimization of a novel NPR bumper system', *Compos. Part B Eng.*, τ. 153, σελ. 78–96, Νοεμβρίου 2018, doi: 10.1016/j.compositesb.2018.07.024.

[66] W. Hou, P. He, Y. Yang, και L. Sang, 'Crashworthiness optimization of crash box with 3D-printed lattice structures', *Int. J. Mech. Sci.*, τ. 247, σελ. 108198, Ιουνίου 2023, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2023.108198.

[67] K. Chawla *κ.ά.*, 'Property optimized energy absorber for automotive bumpers utilizing multi-material and structural design strategies', *Mater. Des.*, τ. 253, σελ. 113724, Μαΐου 2025, doi: 10.1016/j.matdes.2025.113724.

[68] E. S. Yeshanew *κ.ά.*, 'Experimental investigation and crashworthiness analysis of 3D printed carbon PA automobile bumper to improve energy absorption by using LS-DYNA', *Adv. Mech. Eng.*, τ. 15, τχ. 6, σελ. 16878132231181058, Ιουνίου 2023, doi: 10.1177/16878132231181058.

[69] K. Chawla *κ.ά.*, 'Property optimized energy absorber for automotive bumpers utilizing multi-material and structural design strategies', *Mater. Des.*, τ. 253, σελ. 113724, Μαΐου 2025, doi: 10.1016/j.matdes.2025.113724.

[70] M. Najafi, H. Ahmadi, και G. Liaghat, 'Experimental investigation on energy absorption of auxetic structures', *Mater. Today Proc.*, τ. 34, σελ. 350–355, Ιανουαρίου 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2020.06.075.

[71] A. S. Shuaibu, J. Deng, C. Xu, V. P. Ade-Oke, A. Aliyu, και D. Momoh, 'Advancing auxetic materials: Emerging development and innovative applications', *Rev. Adv. Mater. Sci.*, τ. 63, τχ. 1, Ιανουαρίου 2024, doi: 10.1515/rams-2024-0021.

[72] L. L. Hu, M. Zh. Zhou, και H. Deng, 'Dynamic crushing response of auxetic honeycombs under large deformation: Theoretical analysis and numerical simulation', *Thin-Walled Struct.*, τ. 131, σελ. 373–384, Οκτωβρίου 2018, doi: 10.1016/j.tws.2018.04.020.

[73] T. N. Bitzer, *Honeycomb Technology: Materials, Design, Manufacturing, Applications and Testing*. Springer Science & Business Media, 1997.

[74] L. L. Hu, M. Zh. Zhou, και H. Deng, 'Dynamic crushing response of auxetic honeycombs under large deformation: Theoretical analysis and numerical simulation', *Thin-Walled Struct.*, τ. 131, σελ. 373–384, Οκτωβρίου 2018, doi: 10.1016/j.tws.2018.04.020.

[75] L. J. Gibson, ‘Cellular Solids’, *MRS Bull.*, τ. 28, τχ. 4, σελ. 270–274, Απριλίου 2003, doi: 10.1557/mrs2003.79.

[76] I. G. Masters και K. E. Evans, ‘Models for the elastic deformation of honeycombs’, *Compos. Struct.*, τ. 35, τχ. 4, σελ. 403–422, Αυγούστου 1996, doi: 10.1016/S0263-8223(96)00054-2.

[77] L. L. Hu, M. Zh. Zhou, και H. Deng, ‘Dynamic crushing response of auxetic honeycombs under large deformation: Theoretical analysis and numerical simulation’, *Thin-Walled Struct.*, τ. 131, σελ. 373–384, Οκτωβρίου 2018, doi: 10.1016/j.tws.2018.04.020.

[78] J. X. Qiao και C. Q. Chen, ‘Impact resistance of uniform and functionally graded auxetic double arrowhead honeycombs’, *Int. J. Impact Eng.*, τ. 83, σελ. 47–58, Σεπτεμβρίου 2015, doi: 10.1016/j.ijimpeng.2015.04.005.

[79] X. Zhao, Q. Gao, L. Wang, Q. Yu, και Z. D. Ma, ‘Dynamic crushing of double-arrowed auxetic structure under impact loading’, *Mater. Des.*, τ. 160, σελ. 527–537, Δεκεμβρίου 2018, doi: 10.1016/j.matdes.2018.09.041.

[80] D. Mousanezhad, B. Haghpanah, R. Ghosh, A. M. Hamouda, H. Nayeb-Hashemi, και A. Vaziri, ‘Elastic properties of chiral, anti-chiral, and hierarchical honeycombs: A simple energy-based approach’, *Theor. Appl. Mech. Lett.*, τ. 6, τχ. 2, σελ. 81–96, Μαρτίου 2016, doi: 10.1016/j.taml.2016.02.004.

[81] S. Tabacu, R. F. Negrea, και D. Negrea, ‘Experimental, numerical and analytical investigation of 2D tetra-anti-chiral structure under compressive loads’, *Thin-Walled Struct.*, τ. 155, σελ. 106929, Οκτωβρίου 2020, doi: 10.1016/j.tws.2020.106929.

[82] L. Kai, C. Xiaofei, Z. Peng, W. WenWang, και L. Ying, ‘Dynamic mechanical performances of enhanced anti-tetra-chiral structure with rolled cross-section ligaments under impact loading’, *Int. J. Impact Eng.*, τ. 166, σελ. 104204, Αυγούστου 2022, doi: 10.1016/j.ijimpeng.2022.104204.

[83] D. M. Haid, O. Duncan, J. Hart, και L. Foster, ‘Characterisation of thermoplastic polyurethane (TPU) for additive manufacturing’.

[84] ‘Ultimaker-TPU95A-TDS-v5.00’.

[85] K. Moj, G. Robak, και R. Owsiński, ‘Optimization of the numerical homogenization method for cellular structures manufactured by Selective Laser Melting’, *Procedia Struct. Integr.*, τ. 56, σελ.

120–130, 2024, doi: 10.1016/j.prostr.2024.02.046.

[86] R. Das και G. S. Kumar, ‘A comprehensive study on numerical homogenization of re-entrant honeycomb lattice and analytical model assessment’, *Int. J. Mech. Mater. Des.*, τ. 21, τχ. 1, σελ. 181–207, Φεβρουαρίου 2025, doi: 10.1007/s10999-024-09732-6.

[87] V. Giurgiutiu, ‘Chapter 2 - Fundamentals of Aerospace Composite Materials’, στο *Structural Health Monitoring of Aerospace Composites*, V. Giurgiutiu, Επιμ., Oxford: Academic Press, 2016, σελ. 25–65. doi: 10.1016/B978-0-12-409605-9.00002-7.

[88] A. N. Norris, ‘The isotropic material closest to a given anisotropic material’, 25 Νοέμβριος 2005, *arXiv*: arXiv:cond-mat/0509705. doi: 10.48550/arXiv.cond-mat/0509705.

[89] S. Sayın και Z. Kıral, ‘Improved Static and Dynamic Behavior of Auxetic Structures with Radial Limb Design’, *Appl. Sci.*, τ. 15, τχ. 17, σελ. 9343, Ιανουαρίου 2025, doi: 10.3390/app15179343.